



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KARI MUSTALAHTI
VESIKUITUSUSPENSION VIRTAUSOMINAISUUKSIEN MITTAUS

Diplomityö

Tarkastajat: professori Reijo Karvinen,
yliopistonlehtori Seppo Syrjälä ja
tutkijatohtori Matti Lindstedt
Tarkastajat ja aihe hyväksytyt
Luonnontieteiden tiedekunnan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 14. tammikuuta 2015

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

MUSTALAHTI, KARI: Vesikuitususpension virtausominaisuuksien mittaus

Diplomityö, 69 sivua, 5 liitesivua

Maaliskuu 2015

Pääaine: Virtaustekniikka

Tarkastajat: professori Reijo Karvinen, yliopistonlehtori Seppo Syrjälä ja tutkija-tohtori Matti Lindstedt

Avainsanat: vesikuitususpensio, fluidisaatio, rajajännitys, virtaussimulointi

Tämän työn tarkoituksena oli mittaamalla selvittää vesikuitususpension virtausominaisuuksia. Mittauksista saatujen tulosten perusteella pyrittiin määrittämään epänewtoniselle vesikuitususpensiolle materiaalimalli, joka kuvaa sen käyttäytymistä eri virtaustilanteissa. Mittauksissa käytettiin kemiallisesti valkaistuja koivukuituja.

Teoriaosuudessa perehdytään epänewtonisten aineiden teoriaan ja esitellään materiaalimalleja. Vesikuitususpension tärkeimpien ominaisuuksien selvittämiseksi tehtiin katsaus alan kirjallisuuteen ja viimeisimpiin tutkimuksiin.

Mittalaitteiston suunnittelussa ja rakentamisessa hyödynnettiin alalla viime aikoina tehtyjä kokeellisia tutkimuksia. Mittalaitteistona käytettiin rotaatioreometriä, jossa pyöritettiin nelisiipistä lapasysteemiä sylinterinmuotoisessa säiliössä. Lapasysteemit valmistettiin 3D-tulostimella. Staattista rajajännitystä mitattiin kahdella menetelmällä ja dynaamista rajajännitystä yhdellä menetelmällä. Fluidisaation mittaukseen käytettiin PUDV-tekniikkaa, jolla saatiin selville vesikuitususpension nopeusprofiili.

Vesikuitususpension tärkein ominaisuus, staattinen rajajännitys, määritettiin hyvin molemmilla menetelmillä. Menetelmien tulokset olivat hyvin lähellä toisiinsa ja mittauksen toistettavuus oli hyvä. Arvot vastasivat kirjallisuudessa esitetyjä. Dynaaminen rajajännitys havaittiin aikariippuvaiseksi. Pidempi sekoitusaika laski dynaamisen rajajännityksen arvoa. Alhaisilla pyörimisnopeuksilla rajajännitys hallitsi virtausta ja suurilla pyörimisnopeuksilla turbulenssi hallitsi tilannetta, jolloin suspension konsentraatioerojen vaikutus väheni.

PUDV-mittauksissa oli monta virhelähdettä, jotka toivat epätarkkuutta tuloksiin. Mitattujen nopeusprofiilien avulla saatiin selvitettyä fluidisoituneen alueen koko. Nopeusprofiileihin sovitettiin materiaalimallia, jotta saatiin selville materiaalimallin parametrit.

Sovitteista saatuja materiaalimallin parametreja käytettiin virtaussimuloinnissa (CFD), joka tehtiin ANSYS CFX-ohjelmistolla. Simuloituja tuloksia verrattiin mittaustuloksiin. CFD-laskenta ennusti fluidisoituneen alueen koon, paikallisen nopeuden ja momentin suuremmiksi kuin mittauksissa.

Työssä onnistuttiin selvittämään luotettavasti vesikuitususpension rajajännitys. Mittauksen perusteella koivulle ehdotetaan käytettäväksi Herschel-Bulkley-mallia sovitteista saaduilla parametreilla. Jatkotutkimuksen kohteena voisi olla erilaisten kuitutyypin rajajännitykset. PUDV-mittajärjestelyä pitäisi kehittää, jotta saataisiin tarkempia mittatuloksia. Laadullisesti CFD-laskenta antoi kuitenkin järkeviä tuloksia. Tarkemmilla nopeusprofiileilla saataisiin parempi materiaalimalli, jota voitaisiin hyödyntää prosessilaitteiden virtaussimuloinnissa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

MUSTALAHTI, KARI: Measurement of flow properties of pulp suspension

Master of Science Thesis, 69 pages, 5 Appendix pages

March 2015

Major: Fluid Dynamics

Examiners: Professor Reijo Karvinen, University Lecturer Seppo Syrjälä and Postdoctoral Researcher Matti Lindstedt

Keywords: pulp suspension, fluidization, yield stress, computational fluid dynamics

The object of this master's thesis work was to measure rheological properties of pulp suspension. The ultimate goal was to determine rheological model for the pulp suspension. Measurements were performed with bleached birch fibers.

The first section delves into theory and introduces the most common material models of non-Newtonian fluids. Literature in the field and the most recent research were scoped through to gain knowledge of behavior and the most important properties of pulp suspension.

Measurement setup was designed and built utilizing the latest experimental research done in the field. The setup consisted of a rotational rheometer equipped with four-bladed vane geometry. Vane geometries were produced by a 3D printer. Geometry was submerged in a cylindrical container filled with suspension. Static yield stress was measured with two techniques and dynamic with one technique. Fluidization measurements were conducted with local velocimetry (PUDV) technique to solve velocity profiles.

The most important property of pulp suspension, static yield stress, was determined reliably with both techniques. The two different techniques gave almost the same results and repeatability was good. The results were in good agreement with literature values. Dynamic yield stress was observed to be time-dependent. Longer mixing time decreased the value of dynamic yield stress. At low rotational rates yield stress governed the flow and at high rates turbulence controlled the situation. With high rotational rates the effect of different mass concentrations reduced.

PUDV measurements included inaccuracies which affected the reliability of the results. Fluidized areas of pulp suspension were determined with the technique. Material models were fitted to velocity profiles to obtain model constants.

Model constants were used in computational fluid dynamics (CFD) which was performed with ANSYS CFX. The simulated results were compared with experimental results. Simulation predicted fluidization, velocities and torque to be greater than equivalent results from the measurements.

The yield stress of pulp suspension was determined reliably. Herschel-Bulkley model with measured model constants is suggested to use as material model for birch fibers. The objective of future investigation could be the measurement of yield stress of different pulp types. PUDV technique should be improved to get more accurate results. Qualitatively CFD results were consistent. With more accurate velocity profiles, better material model would be achieved. Material model could be utilized in flow simulation in process industry.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisessä yliopistossa Kone- ja tuotantotekniikan laitoksella kesäkuun 2014 ja maaliskuun 2015 välisenä aikana. Työn rahoittajana on toiminut Valmet Technologies Oy.

Haluan kiittää professori Reijo Karvista tutkimusaiheen hankkimisesta. Optimointiin ja virtauslaskentaan sain korvaamatonta apua Matti Lindstedtiltä. Kaikki työssä suoritettut mittaukset on tehty Seppo Syrjälän ammattitaitoisessa valvonnassa. Materiaaliopin laitosta kiitän mittalaitteiden lainasta. Jyväskylän yliopistoa sekä erityisesti professori Markku Katajaa ja Arttu Mieltistä haluan kiittää PUDV-laitteen lainasta ja siihen annetusta koulutuksesta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia samassa työhuoneessa työskennelleitä kollegoitani antoisista keskusteluista ja hyvistä vinkeistä diplomityöprosessin aikana.

Kiitos Jarmo Ruusilalle ja Jari Rintamäelle, jotka auttoivat minua mittalaitteiston rakentamisessa ja osien hankinnassa. Optiikan laitosta ja erityisesti Mikko Närheä haluan kiittää 3D-tulostimen lainasta työtäni varten.

Valmetilta haluan kiittää kaikkia minua opastaneita henkilöitä. Erityiskiitos Juha-Pekka Huhtaselle, jonka neuvot ja kommentit ohjasivat työtäni oikeaan suuntaan.

Perheelleni valtava kiitos tuesta ja avusta koko opintojeni aikana. Lisäksi haluan kiittää kaikkia ystäviäni ja kavereitani, jotka ovat omalla panoksellaan edesauttaneet työni valmistumista. Avopuolisolleni Kaisalle haluan antaa suuren kiitoksen ja lämpimän halauksen kannustuksesta ja jaksamisesta koko diplomityöprosessin aikana.

Tampereella 28.3.2015

Kari Mustalahti

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Epänewtonisten aineiden teoriaa.....	3
	2.1 Newtoninen virtausaine.....	3
	2.2 Epänewtoninen virtausaine	4
	2.2.1 Ajasta riippumattomat nesteet	5
	2.2.2 Ajasta riippuvat nesteet.....	6
	2.2.3 Viskoelastiset nesteet.....	7
	2.3 Mallien teoriaa	8
	2.3.1 Power-law -malli.....	8
	2.3.2 Binghamin plastinen malli	9
	2.3.3 Herschel-Bulkley -malli.....	9
	2.3.4 Muita viskositeettimalleja.....	9
3	Vesikuitususpension käyttäytyminen.....	11
	3.1 Ominaisuudet	11
	3.1.1 Konsentraatio	11
	3.1.2 Kerääntymistekijä	11
	3.1.3 Rajasakeus	12
	3.1.4 Kuidut ja flokkautuminen	13
	3.1.5 Vesikuitususpension reologia	13
	3.2 Hallitsevat yhtälöt	14
	3.3 Virtauksen käyttäytyminen putkessa	15
	3.4 Kemiallisen ja mekaanisen suspension erot.....	16
	3.5 Seinäliukuman vaikutus	17
	3.6 Fluidisoituminen	19
	3.7 Rajajännitys.....	20
	3.8 Kuitujen ja turbulenssin välinen vuorovaikutus.....	24
4	Mittalaitteiston suunnittelu ja rakentaminen.....	26
	4.1 Mittalaitteisto	26
	4.1.1 Lapasysteemit	27
	4.1.2 Säiliöt.....	29
	4.1.3 Reometri.....	31
	4.1.4 PUDV - Pulsed Ultrasound Doppler Velocimeter.....	32
	4.2 Rajajännityksen mittaamenetelmät.....	33
	4.2.1 Liikkeellelähdön maksimimomentti-menetelmä	33
	4.2.2 Kulmanmuutos-menetelmä.....	34
	4.2.3 Dynaamisen rajajännityksen mittaus	35
	4.3 Fluidisoitumisen mittaamenetelmä	35
5	Mittaustulokset ja niiden arviointi	40
	5.1 Testimittaukset	40
	5.2 Rajajännityksen mittaus	44
	5.3 Fluidisaation mittaus	46

5.4	Materiaalimallin sovitus.....	51
5.5	Materiaalimallin parametrit.....	56
5.6	Canadian Standard Freeness ja Schopper Riegler.....	58
6	Virtauksen numeerinen laskenta	59
6.1	Laskentageometria ja reunaehdot.....	59
6.2	Tulokset ja niiden arviointi	61
7	Yhteenveto	64
	Lähdeluettelo.....	66
	Liite 1: Valmistajalta saadut koivukuidun ominaisuudet.....	70
	Liite 2: Mitattuja koivukuidun ominaisuuksia	71

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Kirjainmerkinnät

a	rajajännitysmallin kokeellinen vakio	Pa
A	pinta-ala	m ²
b	rajajännitysmallin kokeellinen vakio	
c	rajajännitysmallin kokeellinen vakio	
c_s	äänennopeus vesikuitususpensiossa	m/s
C_v	kuitujen tilavuusosuus	
C_m	kuitujen massaosuus	
C_s	suspension rajasakeus	
CF	kerääntymistekijä	
dy	yhdensuuntaisten levyjen välinen etäisyys yksinkertaisessa leikkausvirtauksessa	m
d_k	kuidun sisähalkaisija	m
D_k	kuidun ulkohalkaisija	m
D_l	lapasysteemin kokonaishalkaisija	m
F	voima	N
F_d	Doppler-siirtymätaajuus PUDV:ssa	1/s
F_e	PUDV-anturin lähettämän signaalin taajuus	1/s
G	kimmomoduuli	Pa
H_l	lapasysteemin korkeus	m
k_s	Metzner-Otto vakio	
K	Herschel-Bulkley ja power-law -mallin kokeellinen vakio	Pa·s ⁿ
L_k	kuidun pituus	m
n	materiaalimallien leikkausnopeus indeksi	
N	pyörimisnopeus	rpm
p	paine	Pa
R	kuitujen pituus/halkaisija suhde	
R_1	lapasysteemin säde	m
R_2	säiliön sisäsäde	m
R_y	fluidisoituneen alueen säde	m
t	aika	s
T	lapasysteemin pyörimisen luoma vääntömomentti	Nm
T_m	lapasysteemin pyörimisen luoma maksimi- vääntömomentti liikkeellelähdössä	Nm
T_{prf}	pulssien aikaero PUDV:ssä	s
u	nopeus	m/s

u_r	PUDV:llä määritetty vesikuitususpension tangentialinen nopeus	m/s
u_s	virtausaineen liukumanopeus seinällä	m/s
u_y	PUDV:n signaalin suuntainen vesikuitususpension nopeus	m/s
V_{max}	mitattavan nopeuden maksimiarvo PUDV:ssä	m/s
X_{max}	signaalin maksimitunkeutumissyvyys PUDV:ssä	m
y	paikkakoordinaatti PUDV-anturin säteen suunnassa	m

Kreikkalaiset kirjaimet

$\dot{\gamma}$	leikkausnopeus	1/s
ε	muodonmuutos Hooken laissa	
θ	Doppler-kulma PUDV:ssä (asteina)	°
λ	Carreaun mallin kokeellinen aikavakio	s
μ	dynaaminen viskositeetti	Pa·s
μ_{ap}	näennäinen viskositeetti	Pa·s
μ_e	efektiivinen viskositeetti	Pa·s
μ_p	plastinen viskositeetti	Pa·s
μ_0	nollaleikkaus viskositeetti	Pa·s
μ_∞	ääretönleikkaus viskositeetti	Pa·s
ρ	vesikuitususpension tiheys	kg/m ³
τ	leikkausjännitys	Pa
τ_x	jännitys Hooken laissa	Pa
τ_y	rajajännitys	Pa
τ_w	leikkausjännitys lapasysteemin pyörimisen luoman sylinterivaipan pinnalla	Pa
τ_e	leikkausjännitys lapasysteemin ylä- ja alapäässä	Pa
φ_g	kaasuosuus rajajännitysmallissa	
ω	kuidun karheus	kg/m

Lyhenteet

CFD	Computational Fluid Dynamics
CSF	Canadian Standard Freeness
HB	Herschel-Bulkley
PRF	Pulse Repetition Frequency
PUDV	Pulsed Ultrasound Doppler Velocimeter
Re	Reynoldsin luku
°SR	Schopper Riegler

1 JOHDANTO

Vesikuitususpensio on paperi- ja kartonkitekiteollisuuden pääraaka-aine. Toimivien ja energiatehokkaiden prosessilaitteiden suunnittelun kannalta on tärkeää ymmärtää, miten suspensio virtaa laitteissa. Virtauslaskennalla voidaan simuloida prosessilaitteiden toimintaa, mutta antaakseen realistisen kuvan laitteen toiminnasta, simulaatio vaatii luotettavan materiaalmallin kuvaamaan suspension käyttäytymistä. Vesikuitususpensiolle ei ole olemassa yksiselitteistä materiaalmallia, joka kuvaisi tarkasti suspension käyttäytymistä eri virtausilanteissa. Tämän työn tarkoituksena on selvittää vesikuitususpension virtausominaisuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä, jotta suspensiolle saataisiin realistinen ja luotettava materiaalmalli.

Vesikuitususpensio on epänewtoninen neste, jonka virtausominaisuuksien määrittämiseksi vaaditaan aina kokeellista tietoa. Suspensioiden valmistukseen käytetään toisistaan poikkeavia puulajeja ja erilaiset suspensiot soveltuvat eri tavalla erilaisten loppuotteiden kuten paperien, pahvien ja kartonkien valmistukseen. Puulajien välillä suspension ominaisuudet voivat vaihdella merkittävästi ja tästä syystä suspension ominaisuudet on selvitettävä tapauskohtaisesti.

Vesikuitususpensio on monimutkainen monifaasisysteemi. Riittävän suurella konsentraatiolla se käyttäytyy kiinteän aineen tavoin ja hyvin alhaisella konsentraatiolla se virtaa kuin vesi. Puukuidut ovat ohuita, taipuisia ja onttoja noin 1-3 mm mittaisia putkia (Derakhshandeh 2011). Lehtipuiden, kuten koivun ja eukalyptuksen, kuidut ovat pääsääntöisesti lyhyitä ja havupuiden, kuten kuusen ja männyn, kuidut pitkiä. Suspensiokohtaisesti kuiduilla on tietty kokojakauma, joka vaihtelee puun kasvupaikan ja nopeuden mukaan. Jo alhaisella konsentraatiolla kuidut takertuvat toisiinsa muodostaen 1-2 cm halkaisijan kuitukimppuja eli flokkeja (Kerekes ja Schell 1992). Konsentraation edelleen noustessa lisääntyneet kuitujen ja flokkien törmäykset johtavat kuituverkon muodostumiseen. Muodostunut kuituverkko on rikottava, jotta suspensio saadaan virtaamaan. Kuituverkon rikkomiseen vaadittavaa jännitystä kutsutaan rajajännitykseksi, joka onkin vesikuitususpension tärkein yksittäinen ominaisuus. (Duffy 1997)

Kuiduilla on taipumus muodostaa ohut vesikalvo kiinteille pinnoille ja virtauksessa orientoitua virtauksen suuntaan, aiheuttaen suspensiolle leikkausehenevuutta. Riittävän suurella virtausnopeudella vesikuitususpensio fluidisoituu eli alkaa käyttäytyä veden tavoin (Bennington 1996).

Vesikuitususpension mittausten onnistumisen kannalta hyvin suunniteltu ja rakennettu mittalaitteisto on ratkaisevassa roolissa. Suspensiolle ominaisen seinäliukuman estäminen mittalaitteessa on erityisen tärkeää (Samaniuk 2014). Buscall (2010) kritisoi, että edelleen käytetään huonosti vesikuitususpensiolle soveltuvia mittalaitteita –ja

tekniikoita, jotka eivät ota seinäliukumaa huomioon. Alan viimeisimmissä tutkimuksissa (Derakhshandeh 2011, Mosse ja Boger 2012 ja Ein-Mozaffari 2005) on käytetty Nguyen ja Bogerin (1983) kehittämää nelisiipistä lapageometriaa. Tämä tekniikka estää seinäliukuman mittalaitteessa ja aiheuttaa kuituverkon rikkoutumisen suspension sisällä.

Pulssitettu ultraäänitekniikka (PUDV) tarjoaa mahdollisuuden mitata nopeusprofiileita läpinäkymättömistä suspensioista. Tätä tekniikkaa onkin sovellettu vesikuitususpensioon useissa tutkimuksissa (Derakhshandeh 2011, Ein-Mozaffari 2009 ja Saeed 2007). Mitattuun nopeusprofiiliin materiaalimalleja sovittamalla voidaan selvittää materiaalimallien parametrejä ja saada selville fluidisoituneiden alueiden kokoja.

Tässä työssä suunniteltiin ja rakennettiin mittalaitteisto vesikuitususpensiolle. Suunnittelun perustana käytettiin alan viimeisimpiä tutkimuksia. Mittauksissa onnistuttiin selvittämään vesikuitususpension rajajännitys. PUDV-tekniikalla mitattiin nopeusprofiileita vesikuitususpensiosta. Saatujen mittaustulosten perusteella määritettiin vesikuitususpension materiaalimallin parametrit, joita käytettiin virtauslaskennassa (CFD). Suspension virtausta mittalaitteistossa simuloitiin ja CFD-laskennan tuloksia verrattiin mittaustuloksiin.

2 EPÄNEWTONISTEN AINEIDEN TEORIAA

Epänewtoninen virtausaine on neste, jonka virtausominaisuudet eroavat jollain tapaa newtonisten fluidien käyttäytymisestä. Esimerkkejä tällaisesta käyttäytymisestä ovat muun muassa viskositeetin muuttuminen leikkausnopeuden funktiona, aineella havaitut kiinteän aineen ominaisuudet tai aineen viskositeetin muuttuminen ajan funktiona. Monet teollisten prosessien nesteet käyttäytyvät epänewtonisen aineen tavoin. Epänewtonisten aineiden teorian ja käyttäytymisen ymmärrys on tärkeää energiatehokkaiden ja toimivien prosessilaitteiden suunnittelun kannalta. Vesikuitususpension on havaittu olevan viskoplastista, leikkausohenevaa ja tiksotropista. Tässä kappaleessa esitellään epänewtonisten aineiden yleistä teoriaa.

(Derakhshandeh 2011)

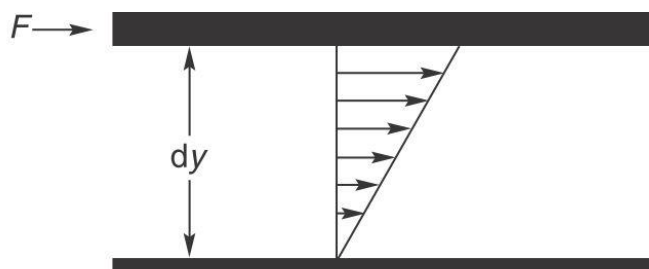
2.1 Newtoninen virtausaine

Newtonisella virtausaineella leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden välinen suhde on lineaarinen. Tätä suhdetta kutsutaan viskositeetiksi ja se ilmaistaan seuraavasti:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1)$$

missä μ on fluidin dynaaminen viskositeetti (Pa·s), τ on leikkausjännitys (Pa) ja $\dot{\gamma}$ leikkausnopeus (1/s).

Yksinkertaisessa leikkausvirtauksessa kaksi yhdensuuntaista levyä on välimatkan dy päässä toisistaan (kuva 2.1.). Levyjen välissä on virtausainetta. Ylemmän levyyn kohdistetaan voima F , jolloin levy liikkuu nopeudella u . Pienillä nopeuksilla levyjen väliin muodostuu lineaarinen nopeusjakauma. Alemman levyn pinnassa nopeus on nolla ja ylemmän levyn pinnassa virtausaineen nopeus on yhtä suuri kuin levyn nopeus eli u .



Kuva 2.1. Yksinkertainen leikkausvirtaus kahden yhdensuuntaisen levyn välissä

Leikkausnopeus määritetään nopeusgradienttina. Kahden yhdensuuntaisen levyn tapauksessa leikkausnopeus on nopeuden u muutos suhteessa etäisyyteen dy eli $\dot{\gamma} = du/dy$. Yleisessä muodossa leikkausnopeus saa muodon:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.2)$$

Ylempään levyyn kohdistettu voima F saa aikaan virtausaineessa yhtä suuren vastakaismerkkisen kitkavoiman. Virtausaineen kitkavoima F jakautuu liikkuvan levyn pinta-alalle A . Tätä voimajakaumaa kutsutaan leikkausjännitykseksi. Leikkausjännitys voidaan myös ilmaista Newtonin viskositeettilailla seuraavasti:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu\dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Newtonisten virtausaineiden viskositeetti on vakio. Tämän määritelmän perusteella viskositeetti on riippumaton leikkausjännityksen tai leikkausnopeuden arvosta. Newtonisten aineiden viskositeetti on vain paineen ja lämpötilan funktio. Esimerkiksi kaasut, orgaaniset nesteet, sulat metallit ja vesi ovat newtonisia aineita. Newtoninen aine ja newtoninen viskositeetti ovat kuitenkin vain malleja, jotka kuvaavat nesteen käyttäytymistä. Todellisuudessa aineet eivät käytäydy täysin Newtonin mallin mukaisesti. (Chhabra 2008)

2.2 Epänewtoninen virtausaine

Epänewtonisille nesteille tietyssä paineessa ja lämpötilassa viskositeetti ei ole vakio, vaan se on funktio leikkausnopeudesta, virtaushistoriasta, virtausgeometriasta, ajasta tai edellisten yhdistelmistä. Chhabra luokittelee tällaiset aineet kolmeen ryhmään:

- (1) Nesteet, joille leikkausnopeus on ainoastaan leikkausjännityksen funktio. Näitä nesteitä kutsutaan ajasta riippumattomiksi, aidosti viskooseiksi tai englanninkielisellä termillä 'generalized Newtonian fluids (GNF)'.
- (2) Nesteet, joille leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden suhde riippuu myös virtaushistoriasta ja ajasta. Näitä nesteitä kutsutaan ajasta riippuviksi
- (3) Seokset, jotka käyttäytyvät nesteen ja elastisen kiinteän aineen tavoin riippuen leikkausjännityksestä. Näitä seoksia kutsutaan viskoelastisiksi aineiksi.

Tämä luokittelu ei ole ehdoton, koska useimmat oikeat nesteet tai seokset käyttäytyvät kahden tai jopa jokaisen kolmen yllä mainitun ryhmän tavoin. Kuitenkin yleensä aineelta löytyy yksi hallitseva ominaisuus, jonka voi ottaa esimerkiksi materiaalimallin perustaksi. Epänewtonisten aineiden tapauksessa usein määritetään näennäinen viskositeetti-

ti, μ_{ap} , joka tarkoittaa leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden suhdetta tietyllä ajanhetkellä ja tietyssä virtaustilanteessa. (Chhabra 2008)

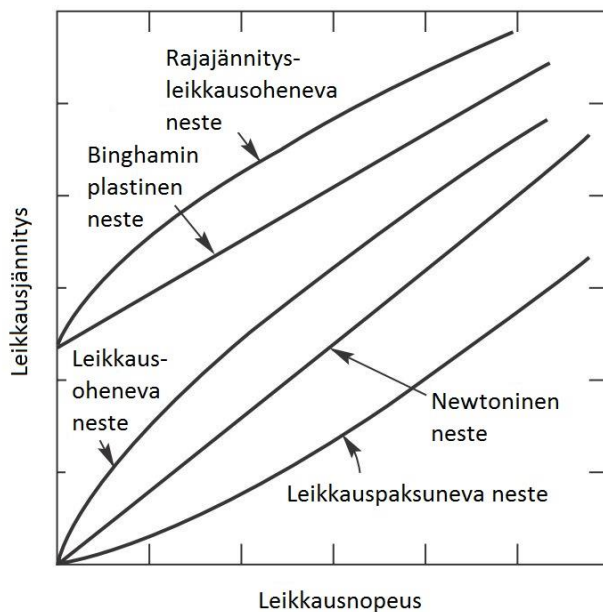
2.2.1 Ajasta riippumattomat nesteet

Tanner jakaa ajasta riippumattomat epänewtoniset nesteet kolmeen alaluokkaan: Binghamin plastiset, leikkausohenevat (*pseudoplastic*) ja leikkauspaksunevat (*dilatant*) (Tanner 2002). Chhabra käyttää hyvin samanlaista jakoa, mutta kutsuu Binghamin plastisia aineita viskoplastisiksi ja perustaa määrittelyn rajajännityksen (*yield stress*) olemassaololle. (Chhabra 2008) Tässä työssä on käytetty Chhabran käyttämää luokittelua.

Yksinkertaisessa leikkauksessa tämän tyyppisten aineiden käyttäytymistä voidaan kuvata seuraavalla yhtälöllä:

$$\dot{\gamma} = f(\tau) \quad (2.4)$$

Tämä yhtälö kertoo, että leikkausnopeus on ainoastaan leikkausjännityksen funktio. Toisaalta voidaan myös sanoa, että leikkausjännitys riippuu ainoastaan leikkausnopeudesta. Kuvassa 2.2. on esitelty erilaisten ajasta riippumattomien epänewtonisten nesteiden käyttäytymistä.



Kuva 2.2. Ajasta riippumattomien virtausaineiden virtauskuvaajia. Leikkausjännitys leikkausnopeuden funktiona. (Chhabra 2008)

Leikkausohenevat nesteet ovat yleisimpiä ajasta riippumattomia epänewtonisia aineita. Leikkausohenevuus tarkoittaa, että näennäinen viskositeetti pienenee leikkausnopeuden kasvaessa. Hyvin suurilla ja pienillä leikkausnopeuksilla suurin osa leikkausohenevista aineista käyttäytyy Newtonisen aineen tavoin. Toisin sanoen viskositeetti on vakio. Näitä näennäisen viskositeetin ääriarvoja kutsutaan nollaleikkausviskositeetiksi, μ_0 , ja ääretönleikkausviskositeetiksi, μ_∞ . Näennäinen viskositeetti siis pienenee arvosta μ_0 arvoon μ_∞ leikkausnopeuden kasvaessa. Esimerkkejä tällaisista nesteistä ovat sementti-vesiseos, veri, ketsuppi, maalit, erilaiset polymeeriseokset. (Chhabra 2008)

Leikkauspaksunevat nesteet ovat harvinaisia ajasta riippumattomien epänewtonisten aineiden joukossa. Leikkauspaksunevalla nesteellä näennäinen viskositeetti kasvaa leikkausjännityksen kasvaessa. Osborne Reynolds (1885) ehdotti seuraavaa selitystä leikkauspaksunevan aineen käyttäytymiselle; levossa konsentraatio-seoksen 'tyhjiys' on minimissään ja seoksessa oleva neste pystyy täyttämään seokset tyhjät alueet. Alhaisilla leikkausnopeuksilla neste voitelee liikkuvia partikkeleita ja leikkausjännitys pysyy melko pienenä. Sen sijaan suurilla leikkausnopeuksilla konsentraation kiinteät kappaleet paisuvat ja venyvät eikä seoksen neste enää pysty voitelemaan liikkuvia partikkeleita yhtä tehokkaasti. Tämä lisää kitkaa, mikä näkyy kasvavana leikkausjännityksenä. Tämä edelleen aiheuttaa näennäisen viskositeetin voimakkaan kasvun leikkausnopeuden kasvaessa. Esimerkkejä tällaisista aineista ovat maissitärkkelys vedessä ja posliinisavi (*china clay*). (Tanner 2002)

Viskoplastiset nesteet ovat virtausaineita, joilla on rajajännitys, τ_y , joka täytyy ylittää ennen kuin aine alkaa virrata. Rajajännitystä pienemmillä jännityksillä tapahtuu elastista tai plastista muodonmuutosta. Ulkoisen jännityksen ylittäessä rajajännityksen aine alkaa virrata. Tällaista käyttäytymistä voidaan selittää olettaen, että levossa aine koostuu rakenteista, jotka ovat riittävän jäykkiä vastustamaan rajajännitystä pienempiä voimia. Ulkoisten voimien ylittäessä rajajännityksen, rakenne murtuu ja alkaa käyttäytyä viskoosin aineen tavoin.

Binghamin plastisella nesteellä on rajajännitys ja näennäinen viskositeetti pysyy vakiona leikkausnopeuden muuttuessa. Jos virtauskäyrä on epälineaarinen ja aineella on rajajännitys, sitä kutsutaan myötö-pseudoplastiseksi (*yield-pseudoplastic*). Vesikuituspensio on yksi tällaisista aineista. (Chhabra 2008)

2.2.2 Ajasta riippuvat nesteet

Monen nesteen käyttäytymistä ei voida kuvata pelkästään yhtälöllä (2.4.), jossa ainoastaan leikkausjännitys vaikuttaa leikkausnopeuteen. Usein aika, jonka neste on ollut leikkausnopeuden alaisena vaikuttaa näennäisen viskositeetin arvoon. Useilla materiaaleilla, jotka ovat olleet pitkään vakio leikkausjännityksen alaisena, materiaalin sisäinen rakenne rikkoutuu siten että sisäiset kitkavoimat pienenevät ja näennäinen viskositeetti laskee. Materiaalin sisäisen rakenteen rikkoutuminen saattaa olla pysyvää tai pelkästään

hetkellisesti leikkausnopeuden aiheuttamaa, jolloin materiaalin päästessä lepoon rakenne palautuu ennalleen.

Nesteen ajasta riippuva käyttäytyminen voidaan jakaa kahteen kategoriaan: *tiksotropia* tarkoittaa, että vakio leikkausnopeuden alaisena aineen näennäinen viskositeetti pienenee ajan myötä. Vesikuitususpensiolla on havaittu tällaisia ominaisuuksia. *Reopektisyys* (*rheopexy*) tarkoittaa, että aineen näennäinen viskositeetti kasvaa ajan myötä vakio leikkausnopeuden alaisena. Tällainen rakenteen muodostus on harvinaista ja suurin osa ajasta riippuvista nesteistä onkin tiksotropisia.

2.2.3 Viskoelastiset nesteet

Hooken lain mukaan kappaleeseen kohdistuva voima on suoraan verrannollinen kappaleen venymään. Kappaleen kokema jännitys τ_x (Pa) voidaan lausua kimmomodulin G (Pa) ja venymän ε avulla seuraavasti:

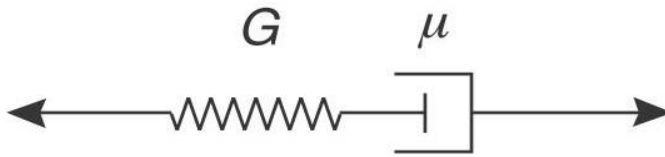
$$\tau_x = -G\varepsilon \quad (2.5)$$

missä venymä $\varepsilon = \Delta L/L$ kuvaa kappaleen pituuden muutosta suhteessa alkuperäiseen pituuteen.

Kiinteän aineen deformatiivissa elastisesti se palautuu alkuperäiseen muotoonsa jännityksen poistuessa. Materiaali, jolla on elastisia ominaisuuksia, käyttäytyy vastaavalla tavalla, jos siihen vaikuttava jännitys on pienempi kuin materiaalin rajajännitys. Rajajännitystä suuremmilla jännityksillä elastista palautumista ei enää tapahdu vaan neste alkaa virrata viskoosin aineen tavoin. Monet materiaalit käyttäytyvät viskoosisti tai elastisesti riippuen virtaustilanteesta. Tällaisia aineita kutsutaan viskoelastisiksi.

Täydellinen viskoosi käyttäytyminen tai täydellinen elastinen käyttäytyminen ovat ääritapauksia viskoelastiselle materiaalille. Joillekin materiaaleille nämä ääritapaukset ovat ainoita, jotka voidaan havaita käytännössä. Aineen vaste riippuu sen rakenteesta ja virtaustilanteesta. Viskoelastinen aine voi käyttäytyä alhaisilla jännityksillä elastisesti kiinteän aineen tavoin. Jännityksen kasvaessa voidaan havaita myös viskooseja ominaisuuksia ja suurilla jännityksillä aine saattaa käyttäytyä viskoosisti kuten Newtoninen aine.

Viskoelastisen käyttäytymisen kuvaamiseksi on luotu useita malleja. Näistä tunnetuimpia ovat Maxwellin malli ja Kelvin-Voigtin malli. Maxwellin mallissa viskoelastista käyttäytymistä kuvataan sarjaankytketyllä jousi-mäntä-systeemillä, jossa jousi vastaa elastista muodonmuutosta ja mäntä viskoosia virtausta. Jousi reagoi välittömästi jännityksen muutokseen varastoiden itseensä energiaa. Mäntän liike on hitaampaa ja palautumatonta ja mäntän liike-energia muuttuu kitkan kautta virtauksen lämpöenergiaksi. Kelvin-Voigt mallissa jousi ja mäntä ovat kytketty rinnakkain. Kuvasta 2.3. selviää Maxwellin mallin periaatteellinen toiminta. (Chhabra 2008) (Tanner 2002)



Kuva 2.3. Maxwellin mallin periaatekuva. Jousi G kuvaa elastista muodonmuutosta ja mäntä μ viskoosia virtausta.

2.3 Mallien teoriaa

Epänewtonisten aineiden käyttäytymisen mallintamiseksi on kehitetty useita materiaalmalleja, joilla kuvataan leikkausjännityksen ja viskositeetin muutosta leikkausnopeuden funktiona. Mallit perustuvat oletukseen, että virtaavat aineet voidaan käsitellä kontinuumina ja ne noudattavat virtausmekaniikan lainalaisuuksia. Mallinnettavan virtausaineen ominaisuudet on tunnettava, jotta osataan valita oikea malli kyseiselle aineelle. Tässä esitellään yleisimpiä epänewtonisten aineiden malleja yksidimensioisessa muodossa. (Huhtanen 1998).

2.3.1 Power-law -malli

Power-law malli on yksi käytetyimmistä malleista kuvaamaan epänewtonisen aineen käyttäytymistä. Yksinkertainen ja helppokäyttöinen malli kuvaa leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden välistä epälineaarista riippuvuutta. Mallin yleinen muoto on seuraava:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

missä K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) ja n ovat mallin kokeellisia parametreja. K on konsistenssi ja n on leikkausnopeus indeksi. Näin ollen power-law mallin näennäinen viskositeetti on:

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.7)$$

Leikkausnopeus indeksi n kuvaa virtausaineen käyttäytymistä leikkausnopeuden kasvaessa seuraavasti:

$n < 1$, virtausaine käyttäytyy leikkausohenevan nesteen tavoin

$n = 1$, virtausaine käyttäytyy kuten newtoninen neste ja leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden suhde on lineaarinen.

$n > 1$, virtausaine käyttäytyy leikkauspaksunevan nesteen tavoin.

Yksinkertainen power-law malli tarjoaa helpon tavan kuvata epänewtonisten aineiden käyttäytymistä, mutta sillä on myös omat heikkoutensa. Yleisesti malli pätee vain tietyllä leikkausnopeusalueella. Mallissa vakiot K ja n ovat samoja kaikilla leikkausno-

peuksilla, mutta todellisuudessa ne muuttuvat leikkausnopeuden funktiona. Malli ei myöskään osaa ennustaa leikkausohenevan nesteen μ_0 tai μ_∞ arvoja pienillä tai suurilla leikkausnopeuden arvoilla. (Chhabra 2008) (Phan-Thien 2002)

2.3.2 Binghamin plastinen malli

Binghamin plastinen malli on yksinkertaisin malli, joka kuvaa viskoplastisen eli rajajännitysnesteen käyttäytymistä. Malli jaetaan kahteen alueeseen; rajarajajännitystä τ_y pienempiin ja suurempiin jännityksen arvoihin:

$$\begin{aligned} \tau(\dot{\gamma}) &= \tau_y + \mu_p \dot{\gamma} & \tau &\geq \tau_y \\ \dot{\gamma} &= 0 & \tau &< \tau_y \end{aligned} \quad (2.8)$$

missä plastinen viskositeetti, μ_p , on virtauskäyrän kulmakerroin.

Mallin mukaan rajajännitystä pienemmillä jännityksillä virtausta ei tapahdu eli leikkausjännitys on nolla. Jännityksen saavuttaessa rajajännityksen aine alkaa virrata lineaarisesti eli leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden suhde on vakio. (Tanner 2002)

2.3.3 Herschel-Bulkley -malli

Herschel-Bulkley -mallissa yhdistetään edellä esiteltyt power-law malli ja Binghamin plastinen malli. Mallin mukaan aineella on tietty rajajännitys, jota ennen virtausta ei tapahdu. Rajajännityksen ylittyessä malli käyttäytyy power-law mallin mukaan epälineaarisesti:

$$\begin{aligned} \tau(\dot{\gamma}) &= \tau_y + K\dot{\gamma}^n & \tau &\geq \tau_y \\ \dot{\gamma} &= 0 & \tau &< \tau_y \end{aligned} \quad (2.9)$$

Tällöin näennäinen viskositeetti saa muodon:

$$\mu_{ap} = K\dot{\gamma}^{n-1} + \tau_y\dot{\gamma}^{-1} \quad (2.10)$$

Herschel-Bulkley -malli on usein käyttökelpoisempi kuin Binghamin plastinen malli, koska monet rajajännitysnesteet ovat käytännössä leikkausohenevia. Esimerkki tällaisesta aineesta on vesikuitususpensio. (Chhabra 2008) (Tanner 2002)

2.3.4 Muita viskositeettimalleja

Carreaun viskositeettimalli

Carreaun viskositeettimallin etuna muun muassa power-law -malliin verrattuna on näennäisen viskositeetin parempi käsittely pienillä ja suurilla leikkausnopeuksilla. Usein

pienillä ja suurilla leikkausnopeuden arvoilla leikkausoheneva aine käyttäytyy newtonisen nesteen tavoin. Tämän ominaisuuden huomioon ottamiseksi Carreaun malli käyttää vakio viskositeettiarvoja pienillä ja suurilla leikkausnopeuden arvoilla. Pienillä leikkauksen arvoilla tämä viskositeetti on nollaleikkaus viskositeetti, μ_0 , ja suurilla leikkauksilla ääretönleikkaus viskositeetti, μ_∞ . Malli kirjoitetaan seuraavasti:

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (2.11)$$

missä leikkausnopeus indeksi $n < 1$ ja λ on mallin aikavakio.

Carreaun malli pystyy kuvaamaan leikkausohenevuutta laajalla leikkausnopeuden alueella, mutta tarvitsee neljä parametria, joista kaikki vaativat kokeellista tietoa. (Chhabra 2008)

Crossin viskositeettimalli

Crossin viskositeettimalli on toinen yleisesti käytetty neljän parametrin malli. Kuten edellisessä mallissa, myös Crossin mallissa on näennäistä viskositeettia rajoittavat alaja ylärajat, μ_∞ ja μ_0 . Crossin malli kirjoitetaan:

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = \frac{1}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^{1-n}} \quad (2.12)$$

missä $n < 1$ ja λ on mallin aikavakio. (Chhabra 2008)

3 VESIKUITUSUSPENSION KÄYTTÄYTYMINEN

Vesikuitususpensio on paperi- ja kartonkiteollisuuden pääraaka-aine. Suspensioiden valmistukseen käytetään toisistaan poikkeavia puulajeja ja erilaiset suspensiot soveltuvat eri tavalla erilaisten lopputuotteiden kuten paperin, pahvien ja kartonkien valmistukseen. Puulajien välillä suspension ominaisuudet voivat vaihdella merkittävästi. Tämän kappaleen tarkoituksena on selvittää vesikuitususpension käyttäytymiseen, ominaisuuksiin, virtaukseen ja sekoittumiseen liittyviä keskeisimpiä tekijöitä sekä esitellä tilannetta hallitsevia yhtälöitä.

3.1 Ominaisuudet

3.1.1 Konsentraatio

Puukuidut ovat taipuisia onttoja putkia keskimitaltaan 1-3 mm ja halkaisijaltaan 15–30 µm. Näiden keskimittojen hajonta on iso jopa yhdelle kuitutyypille. Kuidun pituus määritellään usein painotettuina keskiarvoina. Yksi tyypillisimmistä on pituus-painotettu keskiarvo, joka korostaa pitkien kuitujen merkitystä. (Derakhshandeh 2011)

Vesikuitususpensiota tuotetaan useilla eri sakeuksilla, C_m (kuitujen massa jaettuna suspension kokonaismassalla). Kerekes (1985) jaotteli alueet seuraavalla tavalla: alhainen sakeus ($C_m = 0-5\%$) jossa suspensio on vesi-kuituseosta; keskimääräinen sakeus ($C_m = 5-20\%$) jossa veden suhteellinen määrä vähenee ja korkea sakeus ($C_m > 40\%$). Toinen, Kerekesin (2006) esittämä, tapa luokitella vesikuitususpensioita perustuu seoksen ominaisuuksiin. 10-15 % massaosuuden seos on kostea, kuituinen ja kiinteän aineen tavoin käyttäytyvä, 3-4 % seos on paksu rajajännitys-fluidi ja 0,1-1 % massaosuuden seos käyttäytyy veden tavoin.

Alhaisissa konsentraatioissa suspensio on veden ja kiinteiden kuitujen kaksifaasi-seos. Massaosuuden noustessa lähelle 10 % massan kyky sitoa ilmaa kuituverkoston lisääntyy huomattavasti. Lähestyttäessä 20 %:n sakeutta voi ilmapitoisuus nousta jopa lähelle 50 %:a kokonaistilavuudesta. (Huhtanen 1993)

3.1.2 Kerääntymistekijä

Puukuitujen suuri pituus-halkaisija -suhde ($R = L_k/D_k$ välillä 40–100) aiheuttaa sen, että kuidut ovat kosketuksissa toisiinsa jo pienillä konsentraatioilla. Tällä on merkittävä vaikutus suspension reologiseen käyttäytymiseen. Alhaisissa konsentraatioissa kuitujen välinen kosketus koostuu satunnaisista törmäyksistä. Konsentraation kasvaessa kuitujen

välisistä kontakteista tulee pakotettuja ja konsentraation edelleen kasvaessa kontaktit jäävät pysyviksi. Näitä kuitujen välisiä kontakteja on kuvattu kerääntymistekijän (*crowding factor*) avulla, CF , joka ilmaisee kuitujen lukumäärän pallotilavuudessa, jonka halkaisija on kuidun pituus. (Kerekes 1985) Tämä parametri voidaan ilmoittaa tilavuuskonsentraation C_v , kuidun pituuden L_k ja halkaisijan D_k avulla. Kuiduilla on kuitenkin aina pituus- ja halkaisija jakauma sekä taipumus paisua vedessä. Tästä syystä massakonsentraatio soveltuu paremmin kuitujen lukumäärän laskemiseen ja myös CF :n arvon määrittämiseksi. Kerekes ja Schell (1992) ehdottivat massakonsentraatioon perustuvaa määritelmää CF :lle:

$$CF = \frac{2}{3} C_v \left(\frac{L_k}{D} \right)^2 = 5 C_m \frac{L^2}{\omega} \quad (3.1)$$

missä L_k on kuidun pituus-painotettu keskiarvopituus (m), C_m on massakonsentraatio prosentteina ja ω on kuidun karheus (paino per kuidun pituus kg/m)

Masonin (1950) mukaan $CF > 1$ arvoa voidaan kutsua kriittiseksi konsentraatioksi, minkä jälkeen kyseisessä tilavuudessa on enemmän kuin yksi kuitu. Tällöin virtauksessa kuidut alkavat törmäillä ja tarttua toisiinsa. Kerääntymistekijän saavuttaessa arvon $CF=60$ kuitususpensiossa on noin kolme kontaktia jokaista kuitua kohden. Tämä on toinen kriittinen arvo. Virtauksen hidastuessa taipuisat kuidut jäävät lukkoon ja muodostavat elastisen kuituverkon. (Derakhshandeh 2011)

Martinez (2001) määrittä uuden kriittisen arvon kerääntymistekijälle: $CF=16$. Tämän arvon alapuolella suspensio käyttäytyy laimean liuoksen tavoin. Arvojen $CF=16$ ja $CF=60$ on todettu toimivan kosketusraja-arvona ja jäykkyysraja-arvona kuitususpensioille.

3.1.3 Rajasakeus

Rajasakeudella tarkoitetaan suspension tilaa, jossa kuidut pystyvät täyttämään tilavuuden jatkuvalla rakenteella. Rajasakeutta suuremmilla konsentraation arvoilla suspensio muodostaa aina levossa kuituverkon. Rajasakeuden alapuolella kuiduille ei ole geometrisesti edes mahdollista muodostaa pysyvää kuituverkkoa. Lehtinen et al. (1983) johtivat teoreettisesti rajasakeudelle seuraavan yhtälön:

$$C_s = 108\pi \left(\frac{1}{2R} \right)^2 = 0,8 \dots 5,3 \% \quad (3.2)$$

missä kuitujen pituus/halkaisija on $R=100\dots40$. Tämä rajasakeus riippuu kuidun muodosta ja on sitä pienempi mitä suurempi on kuidun pituus suhteessa halkaisijaan. Kuidun paksuuden pysyessä vakiona kuidun kasvava pituus alentaa rajasakeuden arvoa. Pidemmät kuidut siis muodostavat alemmissa konsentraatioissa pysyvemmän kuituverkon. Korkealaatuisia papereita valmistettaessa paperikoneen perälaatikon sakeus on hyvin lähellä rajasakeutta. Paperimassa ei kuitenkaan ole täysin homogeenista ja paikal-

listen sakeusvaihteluiden vuoksi paikallisia kuituverkostoja voi muodostua virtauksessa alhaisillakin konsentraatioilla, vaikka kokonaiskonsentraatio olisi rajasakeutta alhaisempi. (Lehtinen 1983)

Rajasakeuden käsitteen avulla vesikuitususpensio voidaan jakaa kahteen luokkaan:

Suspensiovirtaus, $C_v \ll C_s$, jossa kuidut voivat pyöriä ja liikkua vapaasti. Kuidut voivat satunnaisesti koskettavaa ja tarttua toisiinsa, mutta edes levossa ne eivät kykene muodostamaan kiinteää kuituverkkoa.

Kuituverkkovirtaus, $C_v \gg C_s$, jossa levossa kuidut muodostavat pysyvän kuituverkon. Suspension virratessa kuidut muodostavat paikallisia kuituverkkoja ja flokkautuvat. Suurella konsentraatiolla suspension ainoa mahdollinen virtaustapa on tulppavirtaus.

Annetut sakeusraajat kuvaavat suspension käyttäytymistä selvästi rajasakeutta pienemmällä tai suuremmilla konsentraatioilla. Rajasakeutta lähellä olevilla konsentraation arvoilla suspension todellinen käyttäytyminen on monimutkaisempaa. Suspensiossa saattaa samanaikaisesti ilmetä suspensiovirtauksen ja kuituverkkovirtauksen ominaisuuksia, mikä johtuu epätasaisesti konsentraatiojakaumasta.

3.1.4 Kuidut ja flokkautuminen

Virtauksessa kuidut kerääntyvät yhteen muodostaen paikallisia kuitukeskittyymiä, joita kutsutaan flokeiksi. Flokit ovat yleensä muutaman kuidun kokoisia. Kerääntymistekijän ollessa $CF < 60$ flokit ovat löyhiä kuitukimppuja, mutta kerääntymistekijän kasvaessa arvoon $CF > 60$ flokeista tulee kiinteitä ja vahvoja. Virtaustilanne vaikuttaa flokkien koon ja muotoon. Esimerkiksi pumppujen ja sekoittimien aiheuttama turbulenssi vaikuttaa vielä pitkään niiden jälkeen sekoittaen virtausta ja näin ollen lisäten kuitujen törmäyksiä, mikä lisää flokkien muodostumista (Kerekes 1983). Kuituflokeilla on paikallisesti suurempi konsentraatio kuin suspensiolla ja tästä syystä flokit ovat myös lujempia ja kestävämpiä kuin muu suspensio. Flokkien ominaisuuksien vuoksi vesikuitususpensio on heterogeeninen massakonsentraation ja lujuuden suhteen, mikä on merkittävä tekijä suspension reologian kannalta. (Derakhshandeh 2011)

3.1.5 Vesikuitususpension reologia

Vesikuitususpensio on veden ja kuitujen muodostama kaksifaasisysteemi. Suurilla konsentraatioilla suspension ilmaisuus kasvaa merkittävästi, jolloin suspensio on kolmifaasisysteemi. Tämä ja muut yllä mainitut vesikuitususpension ominaisuudet tekevät suspension reologiasta erityisen monimutkaisen. Suspension käsittelyssä kontinuumina pitää olla varovainen, koska kuidut ja flokit ovat suhteellisen suuria verrattuna virtauskentän dimensioihin.

Useissa tutkimuksissa on todettu (Wikström ja Rasmuson 1998, Barnes 1997 ja Swerin 1998), että kuituorientaatio ja kuitujen taipumus liikkua pois kiinteiltä seiniltä saavat aikaan vesikalvon seinien lähetyvillä, mikä hankaloittaa reologisia mittauksia. Yleisesti ottaen vesikuitususpension mittaukset ja suspension reologisten ominaisuuksien määrittäminen on haastavaa.

3.2 Hallitsevat yhtälöt

Vesikuitususpension isotermistä virtausta hallitsevat jatkuvuusyhtälö ja liikeyhtälöt. Suspension epänewtoninen käyttäytyminen otetaan huomioon jollakin kappaleessa 2 esitetyllä epänewtonisella materiaalmallilla (yhtälöt (2.6)-(2.12)). Kolmiulotteinen leikkausnopeus on lausuttu leikkausnopeustensorin \mathbf{D} avulla. Usein virtaus oletetaan ajasta riippumattomaksi ja kokoonpuristumattomaksi. Suspensiolla on todettu olevan ajasta riippuvia tiksotropisia ominaisuuksia, mutta nämä yleensä ilmenevät vasta pitkällä aikavälillä. Suspension hetkellistä virtaustilannetta voidaan siis mallintaa ajasta riippumattomana. Alhaisilla konsentraatioilla ilmaosuus on suspensiossa pieni, joten kokoonpuristumattomuus on hyvä oletus. Suurilla konsentraatioilla ilmaosuuden noustessa kokoonpuristuvuus tulisi ottaa huomioon.

Kartesisisessa koordinaatistossa (x, y, z) voidaan yhdelle ajasta riippumattomalle ja kokoonpuristumattomalle jatkuvalla faasille (nopeus $\mathbf{v} = u, v, w$) lausua jatkuvuusyhtälö ja liikeyhtälöt seuraavasti:

$$\operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0 \quad (3.3)$$

$$\operatorname{div}(\rho u \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu_{ap} \operatorname{grad}(u)) \quad (3.4)$$

$$\operatorname{div}(\rho v \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu_{ap} \operatorname{grad}(v)) \quad (3.5)$$

$$\operatorname{div}(\rho w \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu_{ap} \operatorname{grad}(w)) \quad (3.6)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \quad (3.7)$$

$$\dot{\gamma} = [2\mathbf{D}:\mathbf{D}]^{1/2} \quad \mathbf{D}:\mathbf{D} = \sum_{ij} \mathbf{D}_{ij}\mathbf{D}_{ij} \quad (3.8)$$

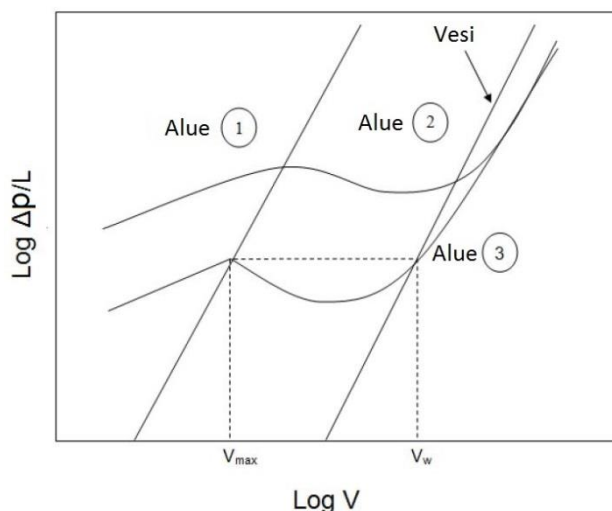
missä p on paine, ρ on suspension tiheys ja μ_{ap} näennäinen viskositeetti. Gravitaation aiheuttamia tilavuusvoimia ei ole otettu huomioon. (White 2006)

Yhtälöille on olemassa analyttinen ratkaisu vain joissakin yksinkertaisissa tilanteissa. Tästä syystä ne ratkaistaan yleensä jollakin numeerisella menetelmällä. Konsentraation ollessa riittävän pieni voidaan olettaa yksifaasivirtaus. Suurilla konsentraatioilla ilmaosuus kasvaa ja yksifaasioletus ei ole enää voimassa. Monifaasivirtauksille ei ole

olemassa yksikäsitteisiä yhtälöitä. Yksi tapa käsitellä vesikuidun ja ilman muodostaman kaksifaasisysteemin virtausta on olettaa molemmat faasit jatkuviksi. Tällöin molemmille faaseille ratkaistaan jatkuvuusyhtälö ja liikeyhtälöt. Suurimman ongelman kuitenkin muodostaa faasien välinen kytkentä, joka vaatii oman yhtälönsä. Käytännössä vesikuitususpensiota mallinnetaan yksifaasivirtauksena, jossa suspension epänewtoniset ominaisuudet kytketään liikeyhtälöihin näennäisen viskositeetin avulla. Näennäinen viskositeetti kuvaa leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden välistä epälineaarista riippuvuutta. Vesikuitususpension käyttäytymistä parhaiten kuvaava malli on Herschel-Bulkley, jonka mukaan rajajännitystä suuremmilla jännityksillä suspension käyttäytyminen on leikkausohenevaa. Laskennassa voidaan käyttää myös muita viskositeettimalleja, esimerkiksi Binghamin tai Carreaun mallia. (White 2006) (Tanner 2002)

3.3 Virtauksen käyttäytyminen putkessa

Putkivirtaus on yksi yleisimmistä vesikuitususpension virtaustyypeistä. Virtaus voidaan jakaa moneen eri alueeseen painehäviön, kitkan tai muiden ominaisuuksien mukaan. Duffy (1997) jakaa putkivirtauksen karkeasti kahteen alueeseen: tulppavirtaukseen, joka ilmenee alhaisilla virtausnopeuksilla ja *drag reduction*-alueeseen, joka ilmenee suurilla virtausnopeuksilla. Huhtanen (2004) sen sijaan käyttää jakoa viiteen eri alueeseen, joissa on yksityiskohtaisesti kuvailtu virtauksen käyttäytymistä nopeuden kasvaessa. Tässä työssä käytetään kuitenkin klassista Robertsonin et al. (1957) jakoa, jossa putkivirtaukselle on löydetty kolme aluetta. Nämä alueet muodostavat S-muotoisen kitkahäviökäyrän, jossa painehäviö Δp (Pa) on annettu putken virtausnopeuden V (m/s) funktiona. Kuvasta 3.1. selviää kuvaajan muoto.



Kuva 3.1. Kitkahäviökäyrä kemialliselle massalle. Eri virtausalueet on merkitty kuvaan numeroin. (Derakhshandeh 2011)

Alhaisella nopeudella kiinteä kuitutulppa liikuu putkessa eteenpäin raapien putken seinää. Muutamia yksittäisiä kuituja on irronnut tulpasta (Alue 1). Nopeuden noustessa selkeä vesikalvo alkaa muodostua kuitutulpan ja putken seinän välille (alkaa alueen 1

maksimikohdassa). Leikkausvoima kohdistuu vesikalvon alueelle. Virtausnopeuden edelleen noustessa vesikalvon koko kasvaa suhteessa nopeammin kuin virtausnopeus. Tästä aiheutuu leikkausjännityksen pieneneminen putken seinällä ja siitä johtuen painehäviön aleneminen nopeuden kasvaessa (alue 2 maksimin ja minimin välissä). Nopeuden kasvaessa lisää vesikalvo alkaa muuttua turbulentiksi repien ja sekoittaen kuituja vesikalvossa (alueen 2 minimissä). Turbulenssi lisää painehäviötä ja painehäviökäyrä lähtee uudelleen nousuun. Nopeuden noustessa turbulentin vesikalvon koko kasvaa ja lisääntynyt turbulenssi repii kuituja kuitutulpasta lopulta hajottaen sen kokonaan. Tässä pisteessä virtauksen painehäviö tulee pienemmäksi kuin puhtaan veden (alue 3 alkaa tästä pisteestä). Tämä johtuu siitä, että suspensiossa vapaasti liikkuvat kuidut vaimentavat turbulenssin pyörteitä lähellä putken seinää ja näin ollen vähentävät painehäviötä. Nopeuden edelleen kasvaessa virtauksen turbulenssi voimistuu ja suspensiota voidaan kutsua fluidisoituneeksi. Suspensio alkaa siis käyttäytyä puhtaan nesteen tavoin kuiduista huolimatta. Painehäviökäyrä muuttuu logaritmisessa kuvaajassa lineaariseksi. (Derakhshandeh 2011)

Yllä kuvatut alueet kuvaavat alhaisen konsentraation ($C_m=5\%$) suspension käyttäytymistä. Suuremmilla konsentraatioilla virtaus on käytännössä aina tulppavirtaus. Lisäksi suurissa konsentraatioissa suspensio on kokoonpuristuva, koska se sisältää merkittäviä osuuksia ilmaa. (Derakhshandeh 2011)

Suspension käyttäytymistä hallitsevat eri asiat eri alueilla; alhaisilla nopeuksilla mekaaninen seinämäkitka on merkittävä tekijä, kun taas suurilla nopeuksilla turbulenssi hallitsee tilannetta. Suurilla konsentraatioilla paineen vaikutus on hyvin merkittävä. Suspension käyttäytymistä mallinnettaessa tai prosessilaitteita suunniteltaessa on tärkeää ymmärtää merkittävimmät suspensioon vaikuttavat voimat ja niiden vaikutukset. Putkivirtauksen painehäviön mallintamiseksi on tehty paljon työtä, mutta kehitetyt mallit toimivat vain hyvin rajoitetulla alueella. Käytännössä kokeellinen tieto toimii edelleen perustana prosessilaitteita suunniteltaessa. (Derakhshandeh 2011)

3.4 Kemiallisen ja mekaanisen suspension erot

Paperi- ja kartonkimassan tuotanto voidaan jakaa kahteen kategoriaan: kemialliseen ja mekaaniseen massan valmistukseen. Kemiallisen massan valmistus on puuraaka-aineen keittämistä kemikaalien avulla. Keiton tarkoituksena on erottaa puun kuidut toisistaan liuottamalla niitä sitova ligniini kuitujen välistä. Mekaanisen massan valmistuksessa puun kuidut irrotetaan toisistaan hiomalla tai hiertämällä (Metso 2014). Toisistaan poikkeavat valmistustavat vaikuttavat lopullisen massan ominaisuuksiin.

Lehto (2004) tutki kemiallisen ja mekaanisen massan eroja. Tutkimuksen mukaan suurimmat erot löytyvät kuidun seinän rakenteesta. Kemiallisen massan kuidun seinät ovat huokoisempia ja taipuisampia kuin mekaanisen massan kuidun seinät. Kemiallisen massan kuidut ovat turvonneempia, koska ne ovat olleet kauemmin nesteessä kuin mekaanisen massan kuidut. Lisäksi kemiallisen massan kuidun seinät ovat vahvempia. Kemiallisen massan kuiduista pois liuotettu ligniini ei häiritse kuitujen liittymistä toi-

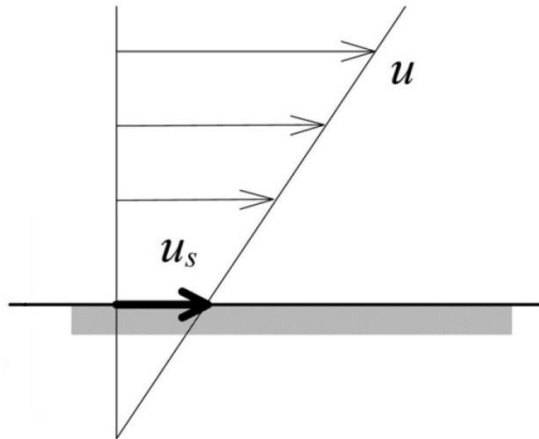
siinsa toisin kuin mekaanisessa massassa. Mekaanisesti massan kuidut ovat pinnaltaan fibrilloituneempia kuin kemiallisen massan kuidut. Mikroskooppisessa skaalassa mekaanisen massan kuidut näyttävät takertuneensa toisiinsa.

Pitkäkuituista mekaanista massaa voidaan käyttää kemiallisen massan korvaajana samojen lujuusominaisuuksien saavuttamiseksi. Toisaalta on olemassa tuloksia joiden mukaan mekaanisen massan lujuusominaisuudet eivät ole yhtä hyviä kuin kemiallisen massan. (Lehto 2004) Lehdon (2003) aiemman tutkimuksen mukaan kemiallisen massan repäisyindeksi (*tear index*) ja murtoenergia (*fracture energy*) ovat suurempia kuin mekaanisen massan samalla kuitupituudella.

Yhteenvetona voidaan todeta, että mahdollisimman taipuisat, mutta toisaalta myös lujat kuidut ovat paperinvalmistuksen kannalta haluttuja. Kemiallisen ja mekaanisen massan suurimmat erot ovat rakenteellisia, mutta pinnan kemialla on myös vaikutusta. Kuidun pinnan fibrillaatiolla ei voida pelkästään selittää kuitujen lujuusominaisuuksia. Mekaanisen massan kuitujen suurempi fibrillaatio lisää kuituverkon lujuutta, mutta kemiallisen massan taipuisimmat ja toisiinsa hanakammin liittyvät kuidut ovat fibrillaatioita merkittävämpää lujuuden kannalta. Kemiallisesti tuotetuilla kuiduilla on paperinvalmistuksen kannalta enemmän haluttuja ominaisuuksia kuin mekaanisesti valmistetuilla. (Lehto 2004) Vesikuitususpension pumppauksen ja virtauksen kannalta kemiallinen massa muodostaa vahvemman kuituverkon, jonka rikkomiseen vaaditaan enemmän energiaa.

3.5 Seinäliukuman vaikutus

Klassisen newtonisen teorian mukaan fluidin nopeus seinällä on nolla. On kuitenkin olemassa paljon kokeellista näyttöä, jonka mukaan *no-slip* -oletus ei pidä paikkaansa kaikilla virtausaineilla. (Hatzikiriakos 2012) Seinäliukuman (*wall-slip*) tapauksessa virtausaine ei tartu kitkallisesti seinään ja noudata seinän nopeutta, vaan liukuu virtauksen mukana liikkuen seinää suuremmalla tai pienemmällä nopeudella. Ilmiötä havainnollistaa kuva 3.2., jossa virtaus liu'uttaa seinällä olevaa fluidia nopeudella u_s eteenpäin.

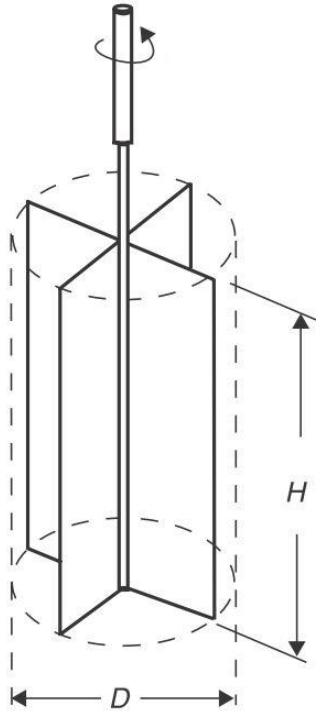


Kuva 3.2. Esimerkki seinäliukumasta, u_s on virtausaineen liukumanopeus seinällä. (Hatzikiriakos 2012)

Seinäliukuma ilmiönä perustuu virtausaineen mikrorakenteen kokoon suhteessa mittalaitteen kokoon tai seinän karheuteen. Esimerkiksi veden virratessa putkessa putken pinnan karheus (1,5–20 μm) on lähtökohtaisesti riittävä pysäyttämään pienten vesimolekyylien (halkaisija $\sim 0,3$ nm) liikkeen putken seinällä. Näin ollen *no-slip* oletus on tässä tapauksessa oikea. Monen virtausaineen mikrorakenne on paljon vettä suurempi ja tästä syystä seinäliukuma on otettava huomioon mittalaitteita suunniteltaessa. Virtausainetta koskettavan mittalaitteen tai pinnan on oltava kooltaan suurempi tai karheampi kuin virtausaineen mikrorakenne pystyäkseen pysäyttämään virtauksen seinälle. (Tanner 2002)

Vesikuitususpensiot ovat rakenteensa vuoksi hyvin alttiita seinäliukumalle, mikä vaikeuttaa useita reologisia mittauksia, kuten rajajännityksen määrittystä. Buscall (2010) esittää, että seinäliukuman huomiotta jättäminen on yhä yleinen ongelma useissa reologisissa mittauksissa ja sopimattomia mittalaitteita käytetään liian usein. Vesikuitususpensio on erityisen hankala, koska kuidut ja flokit ovat suuria verrattuna useisiin muihin samantyyppisiin seoksiin. Viimeisimmät tutkimukset aiheesta (Derakhshandeh 2011, Mosse ja Boger 2012 ja Samaniuk et al. 2014) ovat ottaneet vesikuitususpension seinäliukuman vaikutukset huomioon, mutta useissa muissa tutkimuksissa ei ole yksiselitteisesti onnistuttu estämään seinäliukuman vaikutusta mittauksiin. (Mosse ja Boger 2012) Mittalaitteiden pinnan hiekkapuhaltaminen tai pienten partikkelien liimaaminen mittalaitteen pintaan riittää liukuman estämiseen, jos virtausaineen partikkelit ovat riittävän pieniä. Vesikuitususpension flokkien pysäyttämiseksi tämä ei kuitenkaan riitä. Isompia 'häiriöpaloja' ovat käyttäneet mittalaitteissa Bennington (1990) ja Wikström ja Rasmuson (1998). Bennington käytti 0,3–3 mm kokoisia 'korvia' roottorissa ja Wikström ja Rasmuson käyttivät sylinteriä, jossa oli 3 mm lavat. Buscallin (2010) mukaan mittageometrian koko pitää olla partikkelikoon luokkaa. Tällä perusteella edellä mainitut mittalaitteet eivät pysty tehokkaasti pysäyttämään jopa 1 cm kokoisia kuituflokkeja. (Mosse ja Boger 2012)

Kuitureologian viimeisimmät tutkimukset (Dalpke ja Kerekes 2005, Derakhshandeh 2011 ja Ein-Mozaffari 2005) ovat käyttäneet Nguyen ja Bogerin (1983) kehittämää mittaustekniikkaa välttääkseen seinäliukuman. Tässä mittaustekniikassa nelisiipinen lapa-systeemi (*vane geometry*) pyörii akselinsa ympäri, jolloin pyörimisen luoma kuvitteellinen sylinterin pinta aiheuttaa leikkauksen materiaalin sisällä kuitujen ja flokkien välillä. Mittaustekniikan periaatteellinen toiminta selviää kuvasta 3.3.



Kuva 3.3. Nelisiipisen lapa-systeemin periaatteellinen toiminta. (Chhabra 2008)

Riittävän isoilla siivillä suhteessa partikkelien kokoon ja huolellisella suunnittelulla tällä mittaustekniikalla pystyy estämään seinäliukuman. Seinäliukuman vaikutus on lisäksi otettava huomioon suunniteltaessa säiliötä, johon lapa-systeemi upotetaan. Kirjallisuudesta löytyy kahdenlaisia tapoja välttää seinäliukumaa säiliön ja virtausaineen välillä. Yksi tapa on käyttää karhennettua pintaa tai häiriölevyjä säiliön sisäpinnalla. Toinen tapa on käyttää riittävän suurta säiliötä, jolloin pyörivästä lapa-systeemistä aiheutuvat voimat eivät kulkeudu säiliön seinälle saakka. 'Riittävän suuri' on suhteellinen käsite ja säiliön koko on suunniteltava lapa-systeemin koon ja mitattavan vesikuitususpension ominaisuuksien mukaan.

3.6 Fluidisoituminen

Fluidisaatio kuvaa vesikuitususpension tilaa, jossa suspension eri osat liikkuvat suhteessa toisiinsa siten, että suspensio käyttäytyy nesteen tavoin. Tällaisessa tilassa suspensioilla on nesteen ominaisuudet eli se virtaa leikkausnopeuden alaisena ja välittää painetta joka suuntaan. Paine-energia voidaan muuttaa kineettiseksi energiaksi ja päinvastoin eli

suspensio noudattaa Bernoullin yhtälöä. Fluidisoitunutta suspensiota voidaan pumpata keskipakopumpulla. Tulppavirtausalueella olevaa suspensiota voidaan pumpata vain syrjäytyspumpuilla. (Derakhshandeh 2011)

Fluidisoitumisen aikaansaamiseksi suspension rajajännitys täytyy ylittää. Lähes kaikissa tapauksissa tällaisten jännitysten aikaansaamiseksi suspension on oltava turbulentsissa tilassa. Tästä syystä termejä fluidisaatio ja turbulenssi käytetään rinnakkain vesikuitususpensioita käsiteltäessä. (Derakhshandeh 2011)

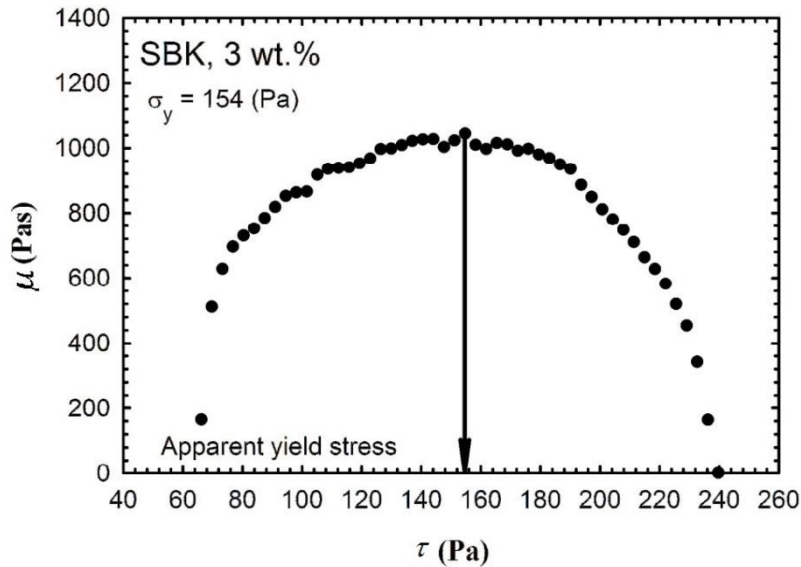
Fluidisaatio voidaan jakaa kahteen alueeseen: flokki-fluidisaatioon ja kuitu-fluidisaatioon. Flokki-fluidisaatio on riittävä pumppaukseen, mutta joissakin prosesseissa vaaditaan kuitu-fluidisaatiota. Kuitu-fluidisaatio vaatii enemmän energiaa kuin flokki-fluidisaatio, koska flokkien sisäiset kitkavoimat on ylitettävä flokin hajottamiseksi. Molemmissa fluidisaatiotyypeissä kuidut ja flokit törmäilevät toisiinsa muodostaen uusia flokkeja toisaalta leikkausvoimien hajottaessa toisia flokkeja. Tämä johtaa turbulentin energian dissipoitumiseen, mikä tarkoittaa, että suspensioon on jatkuvasti lisättävä energiaa fluidisoitumisen ylläpitämiseksi. (Lindroos 1998)

Fluidisaatio on vaikea määrittää tarkasti, koska nopeusprofiilin mittaus läpinäkyvästä kuituvesisuspensioista on haastavaa. Epäsuoria mittausmenetelmiä on kuitenkin kehitetty. Yksi tapa perustuu pyörivässä laitteessa vaadittavaan vääntömomenttiin, jolla saadaan luotua turbulenti tila vesikuitususpensiolle tunnetussa virtausgeometriassa. (Gullichsen ja Härkönen 1981) Bennington ja Kerekes olettavat, että fluidisaatio tapahtuu kun suspension paikallinen leikkausjännitys ylittää vesikuitususpension rajajännityksen. Tämän jännityksen ylittävä fluidisaatio on flokki-fluidisaatiota. Paikallisen leikkausjännityksen kasvaessa on mahdollista, että flokit alkavat hajota kuiduiksi ja saavutetaan kuitu-fluidisaatio. (Bennington 1996) Muut fluidisaation määrittäytävät perustuvat pääasiallisesti virtauksen turbulentin tilan määrittämiseen pyörivissä laitteissa. (Derakhshandeh 2011)

3.7 Rajajännitys

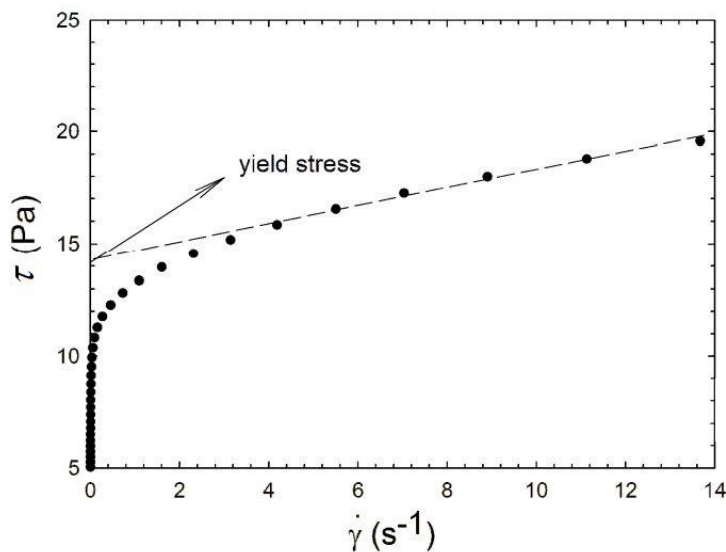
Rajajännitys, τ_y , on vesikuitususpension tärkeimpiä ominaisuuksia. Rajajännitys määrää voiman, joka vaaditaan kuituverkon rikkomiseen. Rajajännityksen todellisesta olemassaolosta on kuitenkin useita näkemyksiä. Yhden määritelmän mukaan rajajännitys ei ole todellinen fysikaalinen ominaisuus, vaan yksinkertaistettu malli aineen elastisesta käyttäytymisestä rajajännitystä pienemmillä arvoilla. Näkemyserojen vuoksi on otettu käyttöön näennäisen rajajännityksen käsite, joka on osoittautunut käyttökelpoiseksi suureeksi. (Chhabra 2008)

Näennäisen rajajännityksen määrittämiseksi on useita tapoja. Derakhshandeh (Derakhshandeh 2011) esittelee kirjallisuusselvityksessään kolme tapaa. Näistä menetelmistä saa käsityksen, miten rajajännitys voidaan määrittää. Maksimiviskositeettimenetelmässä näennäinen rajajännitys on se leikkausjännityksen arvo, millä viskositeetti saavuttaa maksimiarvonsa leikkausjännitystä kasvatettaessa. Menetelmää havainnollistaa kuva 3.4.



Kuva 3.4. Maksimiviskositeettimenetelmä (Derakhshandeh 2011)

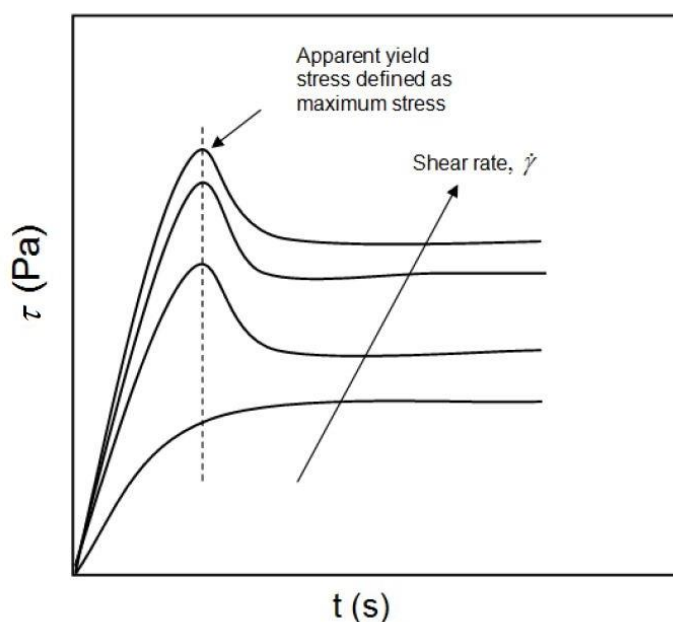
Toisessa tavassa ekstrapoloidaan jännitys-nopeuskäyrän lineaarista osaa nolla leikkausnopeuteen asti, jolloin näennäisen rajajännityksen arvo on ekstrapoloidun suoran ja y-akselin leikkauspiste. Kuva 3.5. selventää menetelmää



Kuva 3.5. Ekstrapolaatiomenetelmä. Pystyakselille ekstrapoloidun suoran leikkauspiste kuvaa näennäisen rajajännityksen arvoa. (Derakhshandeh 2011)

Kolmas tapa on maksimijännitysmenetelmä, jossa leikkausnopeutta kasvatetaan kunnes virtaus alkaa. Maksimileikkausjännitys saavutetaan juuri ennen kuin virtaus lähtee liikkeelle ja tätä arvoa kutsutaan näennäiseksi rajajännitykseksi. Virtauksen alkamisen jälkeen jännityksen arvo laskee. Tällainen käyttäytyminen voidaan rinnastaa kiinteän kappaleen lepo ja liikekitkan määrittelyyn, jossa lepokitka on liikekitkaa suurempi.

Tämä tukee oletuksia, joiden mukaan vesikuitususpension voidaan, olosuhteita riippuen, kuvitella käyttäytyvän kiinteän aineen tai nesteen tavoin. Maksimijännitysmenetelmää havainnollistaa kuva 3.6.



Kuva 3.6. Maksimijännitysmenetelmä. Liikkeellelähtöhetkellä leikkausjännitys saavuttaa maksimiarvonsa. (Derakhshandeh 2011)

Vesikuitususpension rajajännityksen määrittäminen voidaan jakaa kahteen tapaan. Ensimmäisessä tavassa selvitetään voimaa, jolla virtaus lähtee liikkeelle levosta. Toisin sanoen halutaan selvittää voima, joka vaaditaan kuituverkon rikkomiseen. Tällä menetelmällä saatua rajajännityksen arvoa kutsutaan staattiseksi rajajännitykseksi. Toisessa tavassa mitataan minimivoimaa, joka vaaditaan virtauksen ylläpitämiseksi. Tällä tavalla saatua rajajännityksen arvoa kutsutaan dynaamiseksi rajajännitykseksi. Dynaamisen rajajännityksen arvot ovat lähtökohtaisesti pienempiä kuin staattisen rajajännityksen. (Derakhshandeh 2011)

Vesikuitususpensioiden rajajännityksen selvittämiseksi on tehty paljon tutkimusta. Saaduissa tuloksissa on kuitenkin paljon hajontaa, usein yli 100 %. Hajontaan on monia syitä, muun muassa se miten rajajännitys on määritelty, millaista mittausmenetelmää on käytetty ja minkälainen mittalaite on ollut käytössä. Derakhshandeh et al. (2011) listaa kirjallisuusselvityksessään eri tavalla mitattujen rajajännitysten arvoja. Konsentraatioltaan kolmeprosenttiselle suspensiolle arvot vaihtelevat 19–350 Pa välillä. 6 % suspensiolle hajonta on vielä suurempaa, 60–1220 Pa. Dalpke ja Kerekes (2005) sekä Ein-Mozaffari (2005) ovat todenneet, että kuidun pituudella on merkittävä, jopa 400 %, vaikutus mitattuun rajajännitykseen. Pidemmät kuidut aiheuttavat suuremman rajajännityksen, joten konsentraatioiden välinen vertailu ei ole mielekäästä, paitsi saman puulajin kuitujen sisällä. Hajontaa tuloksiin myös aiheuttavat vesikuitususpension mittauksiin heikosti soveltuvien reometrin käyttö sekä selvästi muista poikkeava rajajännityksen

määritelmä. Swerin (1992) käytti mittauksissaan Couette-menetelmää, jossa mittalaitteen rako on usein liian pieni suhteessa vesikuitususpensioiden kuitujen ja flokkien koon. Lisäksi Swerin käytti rajajännityksen määrittämiseksi värähtelevän leikkausnopeuden menetelmää, jossa rajajännityksen määritelmä perustuu viskoelastisen aineen kimmomodulin muuttumiseen muodonmuutoksen funktiona (Swerin 1992). Damani (1993) käytti rajajännityksen määrittämiseen yhdensuuntaisia pyöriviä levyä. Tämä tapa ei ota huomioon vesikuitususpensiolla esiintyvää seinäliukumaa eikä mittalaitteiden pinnalla ilmenevää vesikalvoa. Damani käytti rajajännityksen määrittämiseen samaa menetelmää kuin Swerin. Molempien saamat rajajännitysten arvot ovat selvästi pienempiä kuin muilla menetelmillä saadut arvot.

Kaikki tutkijat ovat löytäneet rajajännitykselle konsentraation potenssiriippuvuuden. Yksinkertaisin ja paljon käytetty yhtälö rajajännitykselle on:

$$\tau_y = aC_m^b \quad (3.9)$$

missä a [Pa] ja b ovat empiirisiä vakioita ja konsentraatio ilmoitetaan massaprosentteina. Edellä mainittujen seikkojen vuoksi voidaan päätellä, että pelkkä konsentraatio ei riitä kuvaamaan tarkasti rajajännityksen käyttäytymistä. Saman totesivat Kerekes et al. (1985), jotka tutkivat rajajännitystä eri virtaustilanteissa ja huomasivat, että empiiristen vakioiden arvot vaihtelevat suuresti esimerkiksi puulajin ja kuitutyypin mukaan.

Suurilla konsentraatioilla, $C_m > 8\%$, suspensio sisältää normaalisti huomattavan määrän ilmaa. Bennington et al. (1995) mittasivat rajajännityksiä konsentraatioista, jotka sisälsivät jopa 90 % ilmaa ja tiivistivät tuloksensa seuraavan yhtälön muotoon:

$$\tau_y = 7,7 \cdot 10^5 C_m^{3,2} (1 - \varphi_g)^{3,4} R^{0,6} \quad (3.10)$$

$$0,004 < C_m < 0,5 \quad \text{ja} \quad 0 < \varphi_g < 0,9$$

missä φ_g on kaasun tilavuusosuus ja R on kuitujen pituuden ja halkaisijan suhde. Tämä yhtälö pätee mekaaniselle ja kemialliselle vesikuitususpensiolle.

Bennington et al. (1990) kehittävät yhtälön näennäisen rajajännityksen kuvaamiseksi ottaen huomioon kuitujen pituuden ja halkaisijan suhteen ja kimmomoduulin:

$$\tau_y = cGR^2C_v^3 \quad (3.11)$$

missä c on kokeellinen vakio, G on vesikuitususpension kimmomoduuli ja C_v kuitujen tilavuusosuus. Malli olettaa kaikki kuidut identtisiksi ja sauvamaisiksi. Todellisuudessa kuitujen pituusjakaumassa on suurta hajontaa. Wikström ja Rasmuson (1998) pyrkivät kehittämään mallia ottamalla huomioon kuitujen ontelomaisen rakenteen. He ottivat kuitujen jäykkyyden huomioon laskemalla kuitujen neliömomentin ja muokkasivat Benningtonin esittämän yhtälön (3.4) muotoon:

$$\tau_y = cGR^2 \left(1 - \frac{d_k^4}{D_k^4}\right) C_v^3 \quad (3.12)$$

missä d_k ja D_k ovat kuidun sisä- ja ulkohalkaisija.

3.8 Kuitujen ja turbulenssin välinen vuorovaikutus

Virtauksessa suspensioon sekoitetut kuidut saavat liike-energiansa kantajafluidiltaan, vesikuitususpension tapauksessa vedeltä. Kuitujen liikkuaessa vedessä ne muuttavat veden virtauskenttää. Vaikutus on siis kaksisuuntainen; virtauksen turbulenssi vaikuttaa kuituihin ja kuidut vaikuttavat turbulenssiin. Kuitujen koko, nopeus ja konsentraatio määräävät millainen kytkentä kuiduilla ja vedellä on kussakin virtaustilanteessa. Turbulenssi vaikuttaa kuitujen liikkeeseen, kuituverkon rakenteeseen, flokkisuuteen ja lämmönsiirtoon sekä kemiallisiin reaktioihin. Kuidut sen sijaan muuttavat turbulenssin intensiteettiä ja sekoittumista. (Ahlstedt 1998) (Karema 1993)

Burges (1938) johti kokeellisesti yhtälön virtauksen suuntaan ja sitä vastaan kohtisuoraan orientoituneen pitkän ja jäykän sylinterin hydrodynaamiselle vastukselle:

$$F_{\parallel} = \frac{2\pi\mu L_k}{\ln(2R)-0,72} (u - v) \quad (3.13)$$

$$F_{\perp} = \frac{4\pi\mu L_k}{\ln(2R)+0,5} (u - v) \quad (3.14)$$

missä $u - v$ on sylinteriä ympäröivän virtauksen ja sylinterin välinen nopeusero, R on kuidun pituus/halkaisija suhde, μ dynaaminen viskositeetti ja L_k kuidun pituus. Virtaus-ta kohtisuorassa olevan sylinterin vastusvoima on noin puolitoistakertainen virtauksen suuntaiseen sylinteriin verrattuna:

$$\frac{F_{\perp}}{F_{\parallel}} = 1,51 \dots 1,58 \quad (3.15)$$

kun $R = 40 \dots 100$.

Burgesin yhtälö soveltuu kuitenkin huonosti kuvaamaan vesikuitususpension kuitujen vastusvoimia. Todellisuudessa kuidut ovat hyvin taipuisia ja ne muuttavat muotoaan virtauskentän ja turbulenssin pyörteiden mukaan. Lisäksi turbulenssin johdosta virtauskenttä ja kuituorientaatio heilahtelevat tietyn keskiarvon ympärillä, joten hetkittäisen vastusvoiman määrittäminen on hankalaa. Virtauskentän mukaisen nopeuskomponentin lisäksi kuidulla on virtaustilanteen mukaan muuttuva pyörimisnopeus. Kuitenkin voidaan todeta, että virtauksen suuntaan orientoitunut kuitu antaa pienemmän virtausvastuksen kuin virtausta vastaan kohtisuorassa oleva kuitu. Kuituorientaatiolla on siis merkitystä virtauksen häviöiden kannalta, vaikka Burgesin esittämää yhtälöä ei niihin suoraan voida soveltaa. (Burges 1938)

Visuaalisten havaintojen mukaan turbulentissa virtauksessa kuidut aiheuttavat turbulenssin energian dissipaatiota ja turbulenssin intensiteetti pienenee sitä enemmän mitä pidempiä kuidut ovat ja mitä suurempi on konsentraatio. Pasula (1997) oletti, että virtauksen ja kuitujen välinen energiasiirto on yksisuuntaista, jolloin energia siirtyy virtauksen turbulenssipyörteistä kuitujen liike-energiaksi. Kuituja pienemmät pyörteet venyttävät ja taivuttavat kuituja dissipoiden lopulta energiansa kuiduille. Kolmogorovin mikroskaalan turbulenssipyörteet ovat jo paljon pienempiä kuin kuidun pituus, joten ne dissipoituvat kuidulle vaikuttamatta niiden liikkeeseen.

Suurilla virtausnopeuksilla kuidut orientoituvat virtauksen suuntaiseksi, mikä laskee suspension näennäistä viskositeettiä. Tästä syystä suspension käyttäytyminen on leikkausohenevaa. Kuidut myös vaimentavat turbulenssin pyörteitä heikentäen sekoittumista, mutta toisaalta pienentäen painehäviötä. Turbulenssin laskennan kannalta turbulenssin pyörrekoko suhteessa kuitujen ja flokkien kokoon on merkittävä tekijä, koska se määrää voidaanko tilannetta käsitellä yksifaasivirtauksena. Turbulenssin pyörteiden tulisi olla isompia kuin kuidut ja flokit, jotta kuidut ja flokit eivät vaikuttaisi merkittävästi turbulenssiin. Todellisuudessa flokit ovat suuria suhteessa turbulenssipyörteisiin, jolloin yksifaasi- ja homogeenisyysoletus eivät pidä täysin paikkaansa. Flokit vaimentavat voimakkaasti turbulenssia, jolloin prosessiin pitää syöttää jatkuvasti lisää energiaa turbulenssin ylläpitämiseksi. Edellä mainituista seikoista huolimatta kuituvesisuspensiota yleensä mallinnetaan homogeenisenä yksifaasivirtauksena. Tällaisista laskentamalleista saadut tulokset vastaavat kokeellisia tuloksia, joten yksinkertaistetun laskentamallin käyttö on perusteltua. (Adams 2007) (Ventura 2011)

4 MITTALAITTEISTON SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN

Tässä työssä käytetyn mittalaitteiston suunnittelun perustana on käytetty alalla viime vuosina ansiokkaasti tehtyjä kokeellisia tutkimuksia. Suunnittelussa on otettu huomioon vesikuitususpension monimuotoiset ominaisuudet sekä mittageometrian soveltuvuus mitattavalle suspensiolle. Mittalaitteisto koostuu lapasysteemeistä, säiliöistä, reometrista ja PUDV-mittalaitteesta. Tässä kappaleessa esitellään vesikuitususpension rajajännityksen ja fluidisaation tutkimukseen suunniteltu ja käytetty laitteisto.

4.1 Mittalaitteisto

Mittalaitteiston suunnittelun perustana käytettiin lapasysteemejä mittageometriana käytänteitä tutkimuksia (Mosse ja Boger 2012 ja Derakhshandeh 2011). Laitteistolla on tarkoitus mitata vesikuitususpension rajajännitys ja selvittää fluidisaatioon vaikuttavia tekijöitä. Laitteiston suunnittelussa otettiin huomioon kappaleessa 3 esitetyt vesikuitususpension erityisominaisuudet, joita ovat muun muassa seinäliukuma, vesikalvon muodostuminen kiinteille pinnoille, suuri kuitu/flokkikoko ja suspension epänewtoniset ominaisuudet.

Seinäliukuma pyörivässä mittalaitteessa pyrittiin välttämään kokonaan käyttämällä lapageometriaa. Lapageometrian etu muihin mittalaitteisiin on se, että mitattavan suspension myötäminen tapahtuu aineen sisällä eikä mittalaitteen pinnalla. Tällä tekniikalla voidaan selvittää suspension todellisia aineominaisuuksia eikä pelkästään sen suhtautumista tietyn kokoiisiin ja muotoisiin mittalaitteisiin. Kuidut ovat yleisesti kokoluokkaa ~1 mm ja flokit suurimmillaan jopa ~1 cm. Mittageometrian on oltava riittävän suuri, jotta se pystyy rikkomaan suspension sisäisen rakenteen. Lapojen kokoa suunnitellessa otettiin huomioon suuri flokkikoko. Lapageometrian pyöriessä on säiliön oltava riittävän suuri, jotta säiliön seinien läheisyys ei vaikuta mittatuloksiin. Mossen ja Bogerin (2012) mukaan 2-3 flokkikokoa riittää minimietäisyydeksi lapageometrian siivenkärjestä säiliön sisäreunaan. Halkaisijaltaan liian pieni säiliö aiheuttaa seinäliukumaa ja kuituverkon rikkoutumisen säiliön seinällä, mikä näkyy epärealistisen pieninä rajajännityksen arvoina mittatuloksissa. Useissa tutkimuksissa (Duffy 1975, Head 1952 ja Gullichsen ja Härkönen 1981) on käytetty häiriölevyjä säiliön seinällä. Levyjen tarkoituksena on vähentää seinäliukumaa ja estää kiinteän kuituverkon pyöriminen virtauksen mukana. Jäsbergin (2007) mukaan vesikuitususpensiossa kiinteille pinnoille muodostuu aina virtauksessa vesikalvo (*depletion layer*), koska kiinteät partikkelit vaeltavat pois kiinteiltä seiniltä. Tässä mittajärjestelyssä on mahdollista, että seinälle välittynyt voima

saa kiinteän kuituverkon pyörimään seinälle muodostuvan vesikalvon ansiosta, vaikka suspension paikallinen rajajännitys ei ylittyisi. Häiriölevyillä tämä ilmiö voidaan poistaa. Tässä työssä käytetyissä säiliöissä on häiriölevy ja seinän etäisyys lavan kärjestä on riittävän suuri.

4.1.1 Lapasysteemit

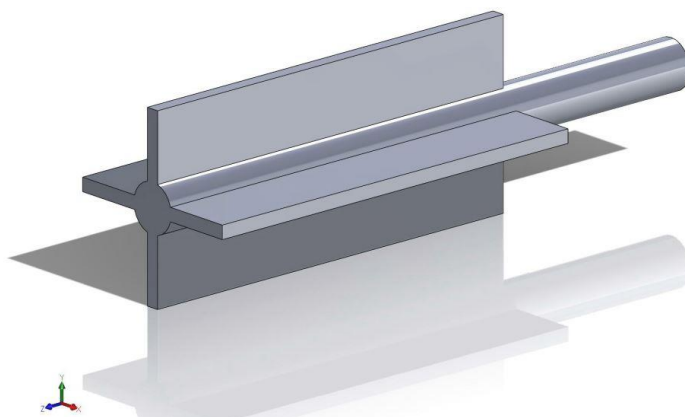
Mittalaitteiston tärkein yksittäinen komponentti on lapasysteemi, joka pyörittää vesikuitususpensiota ja luo siipien kärkien pyöriessä sylinterivaipan, jonka pinnalla suspension myötäminen tapahtuu. Lapasysteemin koolla ja muodolla on merkittävä vaikutus mitausten onnistumiseen. Lapasysteemin siipien on oltava riittävän suuria, jotta ne pystyvät rikkomaan flokkien rakenteen. Toisaalta siivet eivät saa olla liian suuria, ettei lapasysteemi ala pumpata suspensiota liian voimakkaasti. Chhabran mukaan (Chhabra 2008) lapasysteemin korkeus/halkaisija suhde on oltava vähintään kolme, jotta suurin osa pyörimiseen vaadittavasta momentista kohdistuisi pyöriessä muodostuvaan sylinterivaippaan. Lapasysteemin ylä- ja alapään pyörteet (*end-effects*) ovat kokonaismomentin kannalta sitä pienempiä mitä korkeampi lapasysteemi on. Mosse ja Boger (2012) kuitenkin totesivat kokeellisesti, että H/D suhteen on oltava vesikuitususpensiolle vähintään kaksi, jotta ylä- ja alapään pyörteet eivät enää vaikuta merkittävästi mittaustuloksiin.

Monissa tutkimuksissa on korostettu, että lapasysteemin koko ja muoto ovat tärkeitä vesikuitususpensiota tutkittaessa. Missään tutkimuksessa ei kuitenkaan ole mainittu, että lapasysteemin materiaalilla olisi juurikaan merkitystä. Materiaalin on oltava kuitenkin riittävän jäykkää, jotta se ei taivu tai veny pyöriyksessä. Perinteisesti on käytetty metallista (teräksestä, alumiinista tai vastaavasta) juottamalla, koneistamalla ja hitsaamalla valmistettuja lapasysteemejä. Käsityönä metallista valmistetun lapasysteemin rakentaminen on kuitenkin aikaavievää, vaativaa ja melko kallista. Tässä työssä käytetyt lapasysteemit on valmistettu 3D-tulostimella. 3D-tulostuksen etuja ovat muun muassa helppo ja nopea muokattavuus, lyhyt valmistusaika ja halvat valmistus-kustannukset.

Lapasysteemien valmistukseen käytettiin kaupallista Ultimaker 2-tulostinta. Valmistaja ilmoittaa tulostimen piirtotarkkuudeksi 0,02 mm ja maksimitulostus-tilavuudeksi 230 x 225 x 205 mm. Tulostuksessa käytettiin ABS-muovia eli akryylinitriilibutadieenistyreenia ((C₈H₈·C₄H₆·C₃H₃N)_x), josta valmistetaan muuan muassa kotitalouskoneita, kypäriä ja Lego-palikoita. ABS-muovia on jäykkää, kevyttä ja melko edullista. ABS-muovin kimmomoduuliksi ilmoitetaan 1,4–3,1 GPa, joten vesikuitususpension mittauksissa voidaan olettaa muovin olevan riittävän jäykkää. (Ultimaker 2014)

Lapasysteemi mallinnettiin Solidworks-ohjelmistolla ja tallennettiin STL-formaatissa, jonka jälkeen tiedosto siirrettiin tulostimeen tulostusta varten. Tulostus

kesti lapasysteemin koosta riippuen 2-4 tuntia. Kuvassa 4.1. on Solidworks-ohjelmistolla piirretty 3D-malli pienemmästä lapasysteemistä.



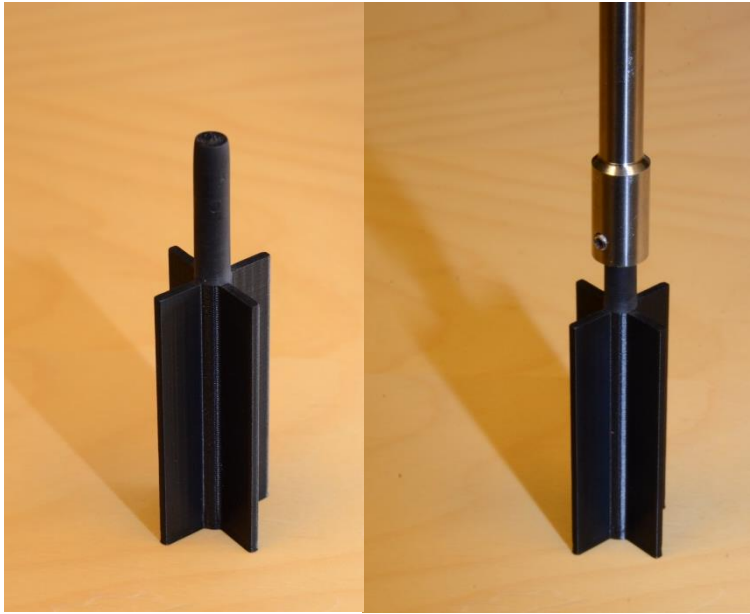
Kuva 4.1. Solidworks-malli pienemmästä lapasysteemistä 3D-tulostusta varten

3D-tulostimella valmistettiin kaksi erikokoista lapasysteemiä. Isompi lapasysteemi tulostettiin ontolla ristikkorakenteella, mikä on tulostimessa oletusasetuksena. Pienempi tulostettiin tiiviinä täysiaineisena. Erikokoisilla lapasysteemeillä voidaan mitata mittalaiteriippumattomasti vesikuitususpension ominaisuuksia. Käytettyjen lapasysteemien mitat ovat taulukossa 4.1.

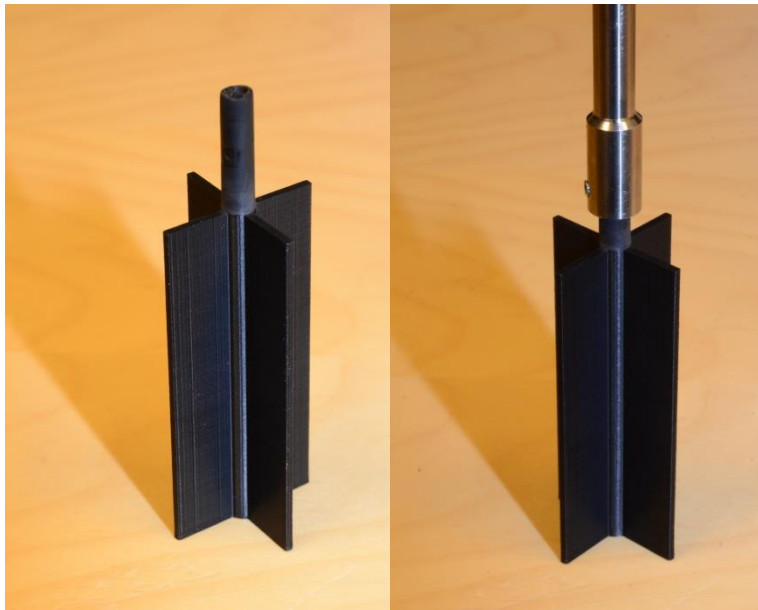
Taulukko 4.1. Lapasysteemien dimensiot

	Iso lapa	Pieni lapa
Lapojen lukumäärä	4	4
Korkeus [mm]	80	60
Halkaisija [mm]	37	27
Kokonaiskorkeus [mm]	105	90
Siipien paksuus [mm]	2	2
Siipien pituus [mm]	15	10
H/D	2,16	2,22

Lapasysteemi kiinnitettiin Anton Paar reometrin mittavarteen. Mittavarsi on koneistettu tarkasti pyörimään keskeisesti, joten siihen kiinnitetty lapasysteemikin pyörii keskeisesti. Lapasysteemin varsi mallinnettiin tarkasti mittavarren reikään sopivaksi, jotta sovitteessa ei olisi välystä. Varren pinnan viimeistely tarkkaan mittaan tehtiin vesihiomapaperilla. Lapasysteemi kiristettiin mittavarteen pienellä ruuvilla. Mittavarsi on lapasysteemin vartta jonkin verran paksumpi. Pyöriessään varsi aiheuttaa suspensioon kitkaa, mutta suhteessa lapasysteemin siipien aiheuttamaan vastukseen varren kitka voidaan mittausten mukaan jättää huomioimatta. Kuvissa 4.2. ja 4.3. on esitetty 3D-tulostetut lapasysteemit sekä se, miten ne on kiinnitetty mittavarteen.



Kuva 4.2. Pieni lapasysteemi mittavarrella



Kuva 4.3. Iso lapasysteemi mittavarrella

4.1.2 Säiliöt

Vesikuitususpension mittauksiin tarvitaan säiliö, johon sijoitetaan pyörivä lapasysteemi. Säiliön on oltava riittävän syvä, jotta lapasysteemi voidaan upottaa siten, että se ei ole pohjan tai pinnan välittömässä läheisyydessä. Säiliön halkaisijan tulee olla myös riittävän suuri, jotta lapasysteemin pyöriessä fluidisoitunut alue ei yllä säiliön seinille asti.

Toisin sanoen lapasysteemin halutaan pyörivän siten, että säiliön seinät tai pohja eivät vaikuta tulokseen. Mittauksissa käytettiin kahta läpinäkyvästä akryylimuovista valmistettua pyöreää säiliötä, joissa oli koko korkeuden pituiset häiriölevyt. Läpinäkyvän seinän ansiosta virtauksen käyttäytymistä pystytään seuraamaan visuaalisesti mittausten aikana. Häiriölevyjen tarkoituksena on pysäyttää virtaus säiliön ulkoseinille ja estää vesikalvon muodostuminen, mikä saattaisi aiheuttaa kiinteän kuituverkon pyörimisen jopa rajajännitystä alemmilla arvoilla. Säiliöiden dimensioiden taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2. Säiliöiden dimensioiden taulukko

	Iso säiliö	Pieni säiliö
Korkeus [mm]	180	199
Sisähalkaisija [mm]	125	94
Tilavuus [dm³]	2,2	1,4
Häiriölevyjen lukumäärä	7	5
Häiriölevyjen koko [mm]	3x3	5x3
Materiaali	akryyli	akryyli
Seinän paksuus [mm]	4	3

Kahdella erilaisella lapasysteemillä ja kahdella erikokoisella säiliöllä voidaan muodostaa neljä erilaista kombinaatiota. Sakeuden muuttuessa myös suspension ominaisuudet muuttuvat ja neljällä eri lapa-säiliö-vaihtoehdolla löydetään jokaiselle suspensiolle soveltuvin mittalaitteisto. Kuvasta 4.4. nähdään mittauksessa käytetyt säiliöt ja lapasysteemit.



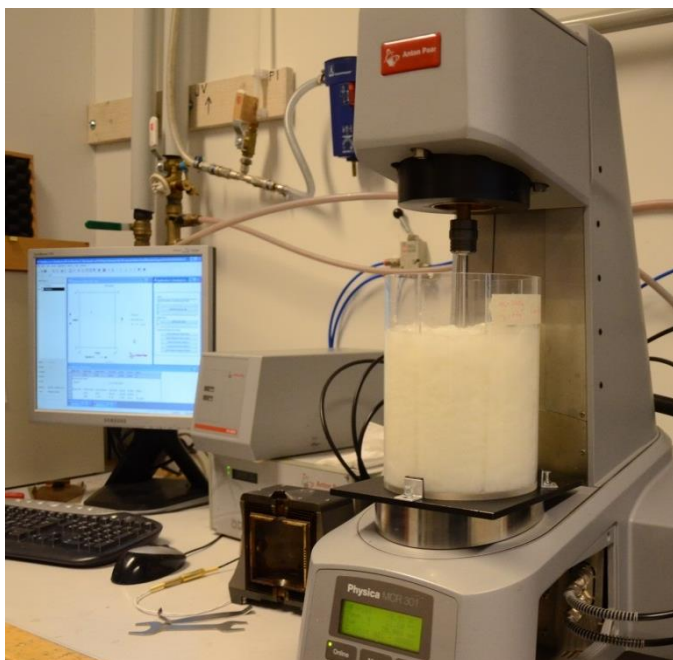
Kuva 4.4. Lapasysteemit ja säiliöt. Vasemmalla pieni säiliö (1,4 l) ja pieni lapasysteemi. Oikealla iso säiliö (2,2 l) ja iso lapasysteemi.

4.1.3 Reometri

Mittauksissa käytettiin kaupallista Anton Paar Physica MCR 301-reometriä, joka on suunniteltu erilaisten polymeerien ja emulsioiden viskositeetin mittaukseen. Laitteessa ei ollut valmiina vesikuitususpension mittaukseen soveltuvaa mittageometriä, joten se valmistettiin itse.

Laitteessa on ilmalaakeroitu sähkömoottori. Ilmalaakeroinnin etuja ovat alhainen kitka, voiteluaineettomuus sekä mittausten toistettavuus ja tarkkuus. Roottorin kiinnitetyt kestopagneetit luovat jatkuvan magneetikentän tuottaen nopean ja viiveettömän vasteen. Roottori liikkuu samalla nopeudella kuin staattorikenttä, joka on toteutettu käämeillä. Tämän ansiosta laitteessa ei ole lämpenemistä aiheuttavia pyörrevirtoja, jotka häiritsevät moottorin toimintaa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että reometri pystyy mittaamaan momentin, pyörimisnopeuden ja kulmanmuutoksen erittäin tarkasti ja luotettavasti. Jokin suureista voidaan myös asettaa vakioksi mittauksen ajaksi ja laite pystyy pitämään tämän suuren vakiona, vaikka suspension vaste muuttuu nopeasti. Laite reagoi myös nopeasti askelmuutoksiin. (AntonPaar 2008)

Reometrin momenttialue on 0,0001 – 200 mNm resoluution ollessa 0,001 μ Nm, joten yli kuuden dekadin momenttialueella laite soveltuu laihojen ja sakeiden vesikuitususpensioiden mittauksiin. Suurilla pyörimisnopeuksilla ja sakeilla suspensioilla laitteen maksimimomentti ei riitä mittausten suorittamiseen. Tällöin voidaan käyttää pienempää lapageometriä, jos vesikuitususpension kuitu- ja flokkikoko tämän sallii. Kulmanmuutoksen mittaustarkkuus on 0,1 - ∞ μ rad ja pyörimisnopeutta voidaan muuttaa välillä 10^{-6} – 3000 1/min. Kuvassa 4.6. on reometri ja sen ohjaukseen käytetty tietokone.

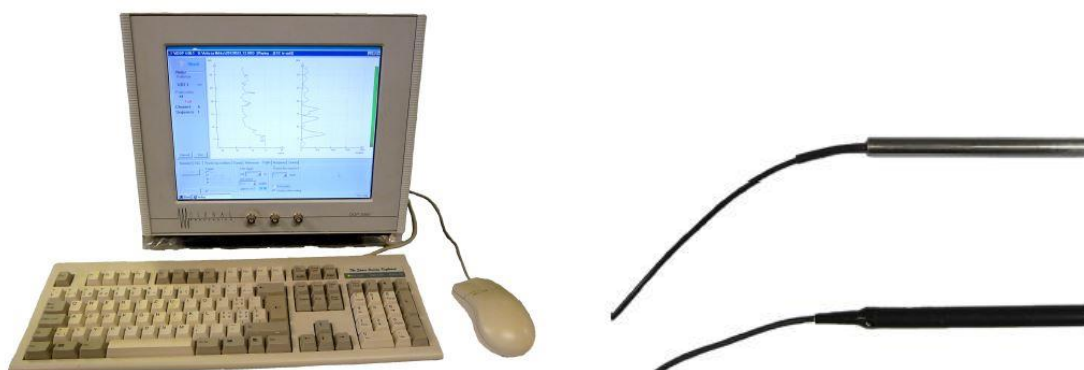


Kuva 4.6. Vasemmallä kuvassa reometrin ohjaukseen käytetty tietokone. Oikealla kuvassa reometri, johon on sijoitettu isompi säiliö.

4.1.4 PUDV - Pulsed Ultrasound Doppler Velocimeter

Ultraääni-Doppler on laite, jolla voidaan mitata nopeuksia ja muotoja erilaisista suspensioista ultraäänipulsseja käyttäen. Tällaisen mittatekniikan yksi tunnetuimmista sovel-luskohteista löytyy lääketieteestä. Sikiön tähystämiseen kohdusta käytetään ultraääniaal-toja. Menetelmä onkin kehitetty juuri lääketieteeseen, mutta sen käyttökelpoisuus on havaittu myös muilla aloilla. PUDV-tekniikka on ainoita tapoja selvittää nopeusprofii-leita läpinäkymättömistä suspensioista. Optista mittalaitetta ei voi käyttää, koska valo ei pääse sisälle suspensioon. (Hanjiang 2003)

Ultraääni-Doppler on tietokone, johon voidaan kytkeä ultraääniantureita ja tuottaa sekä vastaanottaa näiden avulla ultraäänipulsseja. Laite laskee lähetettyjen ultraää-nipulssien ja niiden kaikuja avulla mitattavassa kohteessa esiintyviä nopeuksia pulssin kulkusuunnassa ja tallentaa niistä nopeusprofiilin paikan funktiona. Ultraäänipulssin tunkeutumissyvyyteen voidaan vaikuttaa ultraäänianturin taajuudella ja lähetetyn pulssin taajuudella. Jokaiseen suspensioon on valittava sopivat anturit ja säädettävä signaa-lin voimakkuutta siten, että takaisin heijastuva kaikuprofiili on riittävän voimakas. Ku-vassa 4.7. on PUDV:n ohjaukseen käytettävä tietokone ja ultraäänianturit.



Kuva 4.7. Vasemmalla PUDV:n ohjaukseen käytetyn tietokoneen ruutunäkymä. Oikeal-la ylhäällä metallinen kahdeksan megahertsin anturi ja oikealla alhaalla muovinen neljän megahertsin anturi. (Ahonen 2013)

Virtaavan vesikuitususpension nopeusprofiilin avulla voidaan selvittää suspension pai-kallinen leikkausnopeus ja paikallinen viskositeetti. Lisäksi nopeusprofiilista saadaan selville tärkeitä parametreja epänewtonisiin ja reologisiin malleihin, joita voidaan hyö-dyntää muuan muassa virtauslaskennassa. Virtauslaskennassa epänewtonisen mallin käyttö vaatii aina kokeellista tietoa. Kokeellisen tiedon laatu ja uskottavuus vaikuttavat merkittävästi laskennan tuloksiin.

Jyväskylän yliopistossa suoritetuissa testimittauksissa todettiin, että neljän megaher-tisin anturi soveltuu paremmin tässä työssä käytettyyn mittalaitteistoon, koska sen pulssi pääsee suspensiossa syvemmälle kuin kahdeksan megahertsin anturin pulssi. Kahdeksan megahertsin anturi soveltoi huonosti 4 % koivusellun mittaukseen, koska signaali tun-

keutui vain 20–30 mm syvyyteen. Lisäksi todettiin, että kaiun voimakkuutta alussa pitää heikentää, ettei se peitä muita kaikuprofiileja. *Pulse Repetition Frequency (PRF)* eli pulssintoistotaajuus vaikuttaa mitattavan nopeuden maksimiin ja se on valittava tapauskohtaisesti. Signaalin kulkiessa ilmassa se heikkenee voimakkaasti, joten tämän estämiseksi on anturin kärkeen laitettava ultraäänigeeliä. Signaalin liiallista voimistamista tulee välttää, koska se saattaa aiheuttaa kohinaa, joka vääristää mittatuloksia.

4.2 Rajajännityksen mittausmenetelmät

Vesikuitususpension rajajännitystä voidaan mitata monella eri tavalla. Kappaleessa 3.7. esiteltiin jo muutamia tapoja. Tarkan ja monipuolisen reometrin ansiosta mittausvaihtoehtoja oli useita. Lopulta päädyttiin mittaamaan staattista rajajännitystä kahdella eri tavalla; liikkeellelähdon maksimimomentin ja kulmanmuutoksen avulla. Dynaamista rajajännitystä tutkittiin alentamalla portaittain pyörimisnopeuden arvoa.

4.2.1 Liikkeellelähdon maksimimomentti-menetelmä

Tässä mitattavassa levossa olevaa vesikuitususpensiota aletaan pyörittää vakio pyörimisnopeudella. Pyörimisnopeus on pidettävä riittävän pienenä, jotta lavan pyöriminen ei fluidisoi pienäkään aluetta lavan ympäriltä. Liian suuri pyörimisnopeus antaisi liian suuria rajajännityksen arvoja. Lisäksi liian suuri pyörimisnopeus korostaa viskoosien voimien vaikutusta, mikä tässä tapauksessa vääristää tuloksia, koska halutaan selvittää liikkeellelähdön vaadittavia elastisia voimia. Nguyen ja Boger totesivat, että pyörimisnopeuden tulisi olla väliltä 0,1 – 8 kierrosta minuutissa. (Nguyen ja Boger 1983)

Pyörimisen alkaessa kuituverkkoa ylläpitävät sidokset alkavat venyä. Pyörimisnopeuden pysyessä vakiona venyminen kohdistuu vähitellen kaikkiin kuituverkkoa koossa pitäviin sidoksiin. Tästä syystä mitattu momentti kasvaa liikkeellelähdössä. Lopulta saavutetaan piste, jossa lähes kaikki kuitu-kuitu-sidokset rikkoutuvat ja kuituverkko luhistuu. Reometrissa tämä havaitaan paikallisena maksimimomentin arvona ja suspensio alkaa virrata. Alhaisella pyörimisnopeudella hydrodynaamiset voimat ovat niin pieniä, että rikkoutuneet kuituverkon palaset eivät pysty muodostamaan uudelleen kuituverkkoa. Tästä johtuen mitatun momentin arvo laskee nopeasti maksimiarvon jälkeen. Momentin pienentyessä se alkaa myös värähdellä. Värähtely johtunee vesikuitususpension heterogeenisestä koostumuksesta; flokit rikkoutuvat, syntyvät ja liukuvat sattumanvaraisesti nelilapaisen systeemin siipien pintojen läheisyydessä. (Nguyen ja Boger 1985)

Mittaukseen löytyy analogia kiinteän kappaleen lepo- ja liikekitkasta. Liikkeellelähdön vaadittava voima on suurempi kuin liikkeen ylläpitämiseksi vaadittava voima. Maksimivoima vaaditaan siis kuituverkon rikkomiseen. Kuituverkon rikkoutumisen ajatellaan tapahtuvan pyörivän lapasysteemin siipien kärkien luoman sylinterivaipan pinnalla (kuva 3.3.) ja lapasysteemin ylä- ja alapäässä. Maksimimomentin voidaan ajatella jakautuvan tälle pinnalle ja tästä voidaan laskea rajajännityksen arvo. Nguyen ja Boger (1983) johtivat yhtälön:

$$T = (2\pi R_1 H_l) \tau_w R_1 + 2 \left[2\pi \int_0^{R_1} \tau_e(r) r dr r \right] \quad (4.1)$$

missä T on vääntömomentti, R_1 lapasysteemin säde, H_l lapasysteemin korkeus, τ_w sylinteriseinäen kohdistuva leikkausjännitys ja τ_e lapasysteemin ylä- ja alapään kohdistuva leikkausjännitys. Yhtälön vasemmanpuoleinen termi viittaa leikkausjännityksen aiheuttamaan momenttiin sylinteripinnalla ja oikeanpuoleinen termi lapasysteemin ylä- ja alapään leikkausjännityksen aiheuttamaan momenttiin. Leikkaus-jännitys τ_e on säteen r funktio, mutta funktiota ei tunneta. Pienillä säteen arvoilla voidaan kuitenkin olettaa tekemättä suurta virhettä, että leikkausjännitys on jakautunut tasaisesti siten, että säteen arvon ollessa nolla se saa arvon nolla ja säteen arvon saavuttaessa maksimiarvonsa, R_l , se saa arvon τ_w . Tällöin funktio saa arvon $\tau_e(r) = \tau_w / R_1 (r)$ ja yhtälö 4.1 voidaan integroida. Maksimimomentin arvolla T_m suspension rajajännityksen oletetaan ylittävän ja leikkausjännitys τ_w on yhtä suuri kuin rajajännitys τ_y . Integroimalla yhtälö 4.1 saadaan maksimimomentin arvoksi:

$$T_m = \frac{\pi D_l^3}{2} \left(\frac{H_l}{D_l} + \frac{1}{3} \right) \tau_y \quad (4.2)$$

missä D_l on lapasysteemin kokonaishalkaisija. Järjestämällä yhtälön termit uudestaan saadaan rajajännityksen arvoksi:

$$\tau_y = \frac{2T_m}{\pi D_l^3 \left(\frac{H_l}{D_l} + \frac{1}{3} \right)} \quad (4.3)$$

Ennen jokaista mittausta suspensio saatettiin fluidisoituneeseen tilaan sekoittamalla sitä voimakkaasti vähintään 60 s. Tällä tavoin saatiin jokaiselle mittaukselle samanlainen alkutila.

4.2.2 Kulmanmuutos-menetelmä

Tässä mittaustavassa kasvatetaan momenttia ja mitataan kulmanmuutosta. Mittaus aloitetaan hyvin alhaisista momenteista, jolloin ollaan varmasti rajajännitystä alemmissa arvoissa. Rajajännitystä pienemmillä arvoilla kulmanmuutos kasvaa hitaasti momentin kasvaessa. Näillä rajajännitystä pienemmillä arvoilla lapasysteemi ei kuitenkaan vielä pyöri. Tällä alueella suspension voidaan olettaa käyttäytyvän elastisesti ja plastisesti. Hyvin pienillä momentin arvoilla muodonmuutoksen voidaan olettaa vielä olevan elastista, mutta rajajännitystä vain vähän pienemmillä arvoilla muodonmuutos voidaan olettaa plastiseksi. Nämä päätelmät perustuvat kulmanmuutokseen käyttäytymiseen momentin funktiona ja kappaleessa 2.2.3 mainittuihin vesikuitususpension ominaisuuksiin. Vesikuitususpension elastisia ja plastisia ominaisuuksia pitäisi tutkia lisää, jotta niistä voisi tehdä tarkempia johtopäätöksiä.

Tietyllä ajanhetkellä kulmanmuutos kasvaa erittäin voimakkaasti pienellä momenttivälillä; kuituverkko rikkoutuu ja lapasysteemi lähtee pyörimään. Tämä havaitaan myös visuaalisesti. Kulmanmuutoksen hyppykohdan momentin arvosta voidaan laskea rajajännitys samalla tavalla kuin maksimimomentin tapauksessa. Ennen jokaista mittausta suspensio saatettiin fluidisoituneeseen tilaan sekoittamalla sitä voimakkaasti vähintään 60 sekuntia. Tällä tavoin saatiin jokaiselle mittaukselle samanlainen alkutila.

4.2.3 Dynaamisen rajajännityksen mittaus

Tässä mittaustavassa pyritään selvittämään dynaamista rajajännitystä. Mittaus aloitettiin suurella pyörimisnopeudella ja portaittain pyörimisnopeutta alennettiin mitaten momenttia. Jossain kohtaa käyrä alkaa selvästi poiketa veden käyrästä, jolloin rajajännitys alkaa hallita tilannetta. Rajajännityksen alueella mitattu momentti pysyy lähes vakiona, joten momentista voidaan laskea yhtälöllä (4.3) rajajännitys.

Mittauksissa havaittiin, että mitä pidempään suspensio oli ollut leikkausnopeuden alaisena, sitä alemmaksi dynaamisen rajajännityksen arvo asettui. Yksiselitteistä dynaamisen rajajännityksen arvoa oli siis hankala määrittää, koska arvo asettui eri kohtaan eri aika-askeleilla. Pyörimisnopeuskohtaista aika-askelta muutettiin välillä 2-20 s, jolloin havaittiin, että aika-askelen kasvaessa dynaamisen rajajännityksen arvo pieneni. Vaikka tarkkaa dynaamisen rajajännityksen arvoa ei tällä menetelmällä pystytty määrittämään, voidaan todeta, että virtauksen lähihistorialla on merkittävä vaikutus virtauksen käyttäytymiseen ja dynaamisen rajajännityksen arvoon.

4.3 Fluidisoitumisen mittausmenetelmä

Vesikuitususpension fluidisoitumista mitattiin PUDV-laitteistolla, joka lähettää ja vastaanottaa ultraäänisignaaleita. Signaalien kulkiessa suspensiossa ne heijastuvat takaisin anturille suspension partikkeleista; kuiduista ja flokeista. Anturin lähettämän ja vastaanottaman signaalin aikaeron ja taajuusmuutoksen avulla voidaan laskea suspension paikallinen nopeus anturin säteen suunnassa. Lähetetyn ja vastaanotetun pulssin aikaeron avulla voidaan laskea paikkakoordinaatti pulssin suunnassa seuraavasta yhtälöstä:

$$y = \frac{c_s t}{2} \quad (4.4)$$

missä c_s on äänennopeus suspensiossa ja t aikaero pulssin lähetyksen ja vastaanotetun kaiun välillä. (Takeda 1991) Partikkelin nopeus signaalin suunnassa, $u(y)$, lasketaan Doppler-siirtymä-taajuuden, F_d , (lähetetyn ja vastaanotetun signaalin taajuusero) avulla yhtälöllä:

$$u(y) = \frac{c_s F_d}{2F_e \cos\theta} \quad (4.5)$$

missä F_e on anturin lähettämä taajuus ja θ on Doppler-kulma (anturin lähettämän signaalin ja säiliön pinnan normaalin välinen kulma). (Saeed 2007)

PUDV-anturi asetettiin kiinni muovisäiliön ulkoreunaan. Anturi pystyy mittaamaan nopeuksia vain anturin säteen suunnassa. Anturista pois päin kulkevat kuidut palauttavat positiivisen nopeuden arvon ja anturia kohti tulevat kuidut negatiivisen nopeuden arvon. Anturi ei pysty mittaamaan sädettä kohtisuoraan olevaa nopeutta. Tästä syystä anturia ei voida asettaa yhdensuuntaisesti säiliön säteen kanssa, koska lapasysteemin pyörimisen aiheuttama nopeusprofiili oletetaan tangentialiseksi. Anturi on asetettava tiettyyn kulmaan, jotta todellisesta nopeudesta voidaan laskea anturin säteen suuntainen komponentti. Kulma, johon anturi asetetaan, on valittava siten, että mitattava nopeuden arvo on riittävän suuri. Pienellä kulmalla mitattavan nopeuden arvo on pieni, jolloin mittausvirheen merkitys korostuu. Aiemmissa tutkimuksissa (Ein-Mozaffari 2009 ja Derakhshandeh 2011) Doppler-kulma on ollut luokkaa 5° - 15° suhteessa säiliön pinnan normaaliin. Kuvassa 4.8. on esitetty PUDV-laitteiston mittausjärjestely.



Kuva 4.8. PUDV-laitteiston mittausjärjestely. Vasemmalla mittalaitteisto sivulta ja oikealla takaa, mistä näkyy kuinka anturi on pienessä kulmassa säiliön säteeseen nähden.

Pulssien välinen taajuus eli *Pulse Repetition Frequency* (PRF) vaikuttaa mitattavaan maksimisyvyyteen. Mitattavan maksimisyvyyden yhtälö on:

$$X_{max} = \frac{c_s T_{prf}}{2} \quad (4.6)$$

missä X_{max} (m) on pulssin maksimitunkeutumissyvyys, T_{prf} (s) on lähetettyjen pulssien aikaero. Lähetettyjen pulssien aikaeron kasvaessa maksimitunkeutumissyvyys myös kasvaa, koska suuremmalla aikaerolla pulssi ehtii käymään kauempana suspensi-

ossa. PRF vaikuttaa myös mitattavaan maksiminopeuteen. Nyquistin teoreema määrää mitattavan nopeuden maksimiarvon:

$$V_{max} = \frac{c_s}{4F_e T_{prf}} \quad (4.7)$$

Yhtälöistä (4.6) ja (4.7) havaitaan, että pulssien aikaeron kasvaessa maksimisyvyys kasvaa, mutta mitattavan nopeuden maksimiarvo pienenee. PRF on valittava mittauskohtaisesti siten, että molemmat ehdot täyttyvät riittävän hyvin. Käytännössä on tehtävä aina kompromissi maksiminopeuden ja maksimisyvyyden välillä. (Ein-Mozaffari 2007)

Paikkaresoluutiona käytettiin 0,75 mm. Signaalin voimakkuus on säädettävä tapauskohtaisesti. Tämä vaihe on erittäin tärkeä hyvän mittadatan saamiseksi. Lähtökohteisesti kaikuprofiilia on vaimennettava pienillä syvyyksillä ja voimistettava suuremmilla syvyyksillä. Takaisin heijastuvaa kaikusignaalia voidaan myös voimistaa syvyydellä, jossa tiedetään suspension olevan fluidisoituneessa tilassa. PUDV-laitteisto tarjoaa valmiita vaihtoehtoja kaikuprofiilin säätämiseksi, mutta tässä tapauksessa kaikuprofiilia oli säädettävä käsin mittauskohtaisesti.

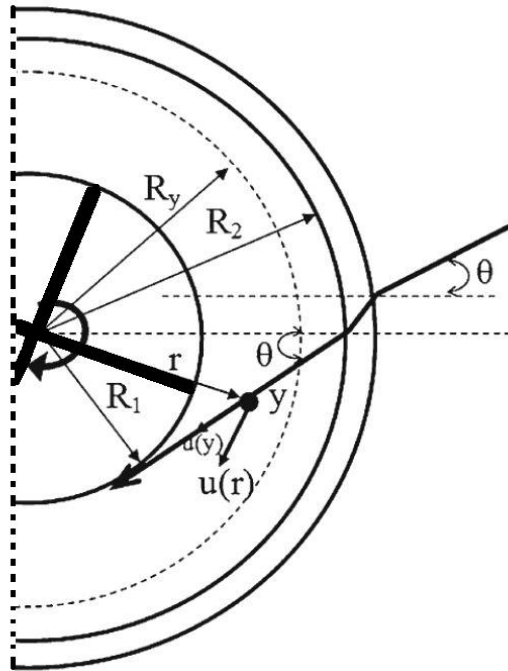
Doppler-kulman määrittäminen tarkasti oli hankalaa. Kulma pyrittiin määrittämään laserin avulla säiliön pinnan heijastuksesta ja laserin antamasta suunnasta suhteessa lapasysteemiin. Molemmissa tavoissa havaittiin epätarkkuutta. Pyörivän lapasysteemin pyöreä muoto aiheuttaa sen, että suurehkolla kulmalla suhteessa säteeseen (20 °) signaali ohittaa lapasysteemin siiven kärjen, jolloin on mahdotonta saada nopeusprofiilia säteen suunnassa. Kulma pyrittiin pitämään melko pienenä (5-10 °), jotta mitattu signaali ei menisi lapasysteemin siiven kärjen ohi. Toisaalta kulma ei saisi olla liian pieni, jolloin mitattavan nopeuden arvo myös pienenee.

Tangentialinopeuden arvo voidaan laskea yhtälöstä (4.8) ja säteen suuntainen paikkakomponentti yhtälöstä (4.9), joissa esiintyvät merkinnät on esitetty kuvassa 4.9. Kuvassa 4.9. ultraäänisignaali osuu lapasysteemin siiven kärkeen, mutta mittauksissa Doppler-kulma oli pienempi, jolloin signaalin kulkema matka oli lyhyempi ja mitatun nopeuden arvo pienempi. (Manneville 2004)

$$u(r) = \frac{r}{R_2 \sin \theta} u(y) \quad (4.8)$$

$$r = \sqrt{R_2^2 + y^2 - 2R_2 \cos \theta} \quad (4.9)$$

missä r on säteen suuntainen paikkakomponentti, R_2 säiliön sisäsäde, y paikkakomponentti signaalin suunnassa ja θ Doppler-kulma.



Kuva 4.9. Periaatekuva PUDV-laitteiston toimintaperiaatteesta. R_1 on lapasysteemin säde ja R_y fluidisoituneen alueen säde. (Derakhshandeh 2011)

Alhaisilla pyörimisnopeuksilla suspension virtaus voidaan olettaa laminaariksi ja lapasysteemin ympärillä olevan fluidisoituneen alueen nopeus voidaan olettaa vain tangentiaaliseksi. Tällöin fluidisoituneen alueen nopeudesta mitattu anturin säteen suuntainen komponentti voidaan hyvällä tarkkuudella projisoida tangentiaali-nopeudeksi. Pyörimisnopeuden kasvaessa fluidisoitunut alue alkaa muuttua ainakin osittain turbulentiksi. Turbulenssiheilahtelu on ainakin jossain määrin mitatun nopeuskomponentin suuntaista. Aiheuttaako turbulenssiheilahtelu virhettä mitattuun nopeuskomponenttiin? Turbulenssi on ajasta-riippuvaa heilahtelua ja PUDV-tekniikassa mitataan monta, jopa 2000, kaukuprofiilia, joista lasketaan keskiarvo. Turbulenssi-heilahtelun pitäisi hävitä, kun keskiarvo otetaan riittävän monesta profiilista. Turbulenssiheilahtelun keskiarvottuessa pois jäljelle jää tangentiaalinopeuden komponentti, joka voidaan projisoida tangentin suuntaan.

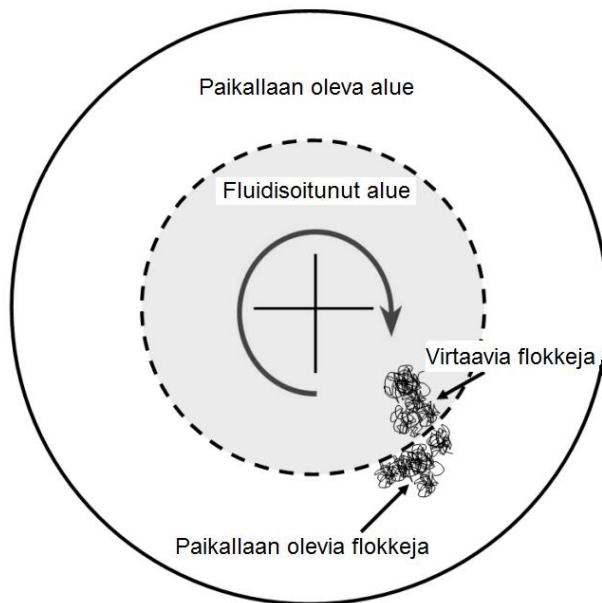
PUDV-laitteistolla pystytään selvittämään fluidisoituneen alueen nopeusprofiili. Nopeusprofiilista voidaan selvittää kohta, jossa suspensio ei enää virtaa. Tässä kohtaa suspensioon kohdistuva leikkausjännitys saavuttaa suspension rajajännityksen. Kuva 4.10. selventää tilannetta. Pyörivän lapasysteemin ollessa kytkettynä reometriin tiedetään myös lapasysteemiin kohdistuva momentti. Tässä työssä on oletettu momentin jakautuvan tasaisesti leikkausjännitykseksi pyörivän lapasysteemin leikkaaman sylinterin pinnalle. Tämä on esitetty yhtälönä (4.10). (Bird 2001)

$$\tau_w = \frac{T}{2\pi h R_1^2} \quad (4.10)$$

missä τ_w on leikkausjännitys pyörivän lapasysteemin leikkaaman sylinterin pinnalla, T reometrin antama momentin arvo ja h lapasysteemin korkeus.

Rajajännityksen arvo voidaan selvittää tunnetusta leikkausjännityksestä ja fluidisoituneen alueen koosta seuraavalla tavalla. (Fisher 2007)

$$\tau_y = \tau_w \left(\frac{R_1}{R_y} \right)^2 \quad (4.11)$$



Kuva 4.10. Periaate kuva säiliössä olevasta lapasysteemistä. Harmaa alue kuvaa fluidisoitunutta aluetta ja valkoinen alue paikallaan olevaa aluetta. (Derakhshandeh 2011)

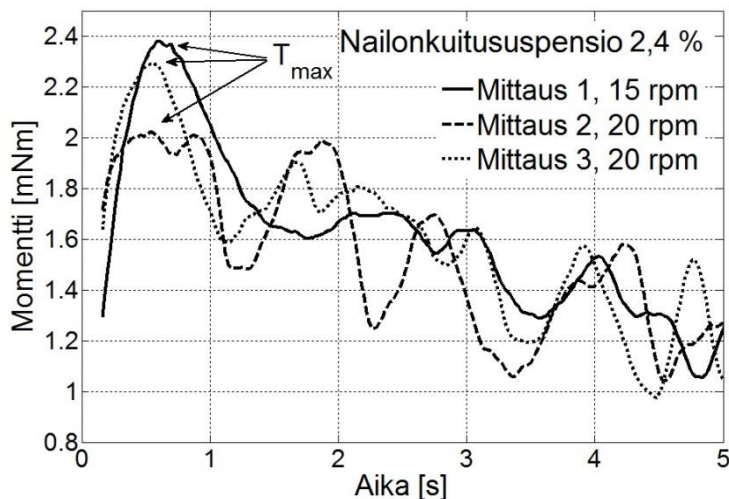
5 MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI

Tässä kappaleessa esitellään reometrilla ja PUDV-laitteistolla saatuja keskeisimpiä tuloksia ja arvioidaan niiden laatua ja luotettavuutta. Saatuja tuloksia verrataan aiempiin tutkimuksiin. PUDV:llä mitattuun nopeusprofiiliin pyritään sovittamaan vesikuitususpension käyttäytymistä kuvaava materiaalimalli.

5.1 Testimittaukset

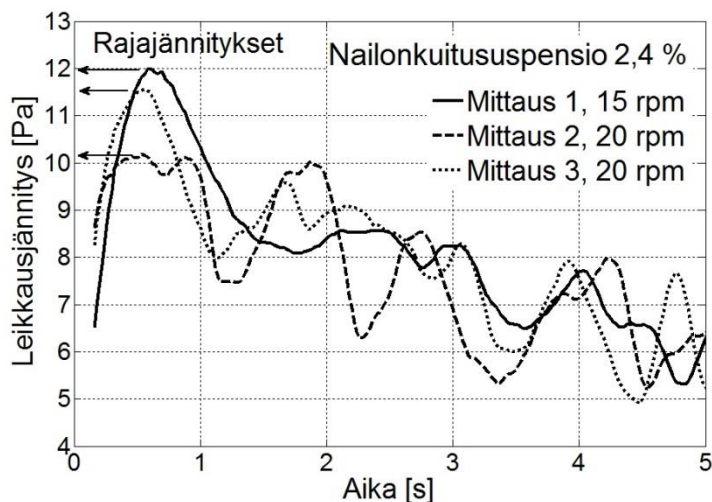
Mittalaitetta ja mittaustekniikoita testattiin nailonkuitususpensiolla. 1,2 ja 2,4 mm nailonkuitususpensio käyttäytyy riittävän sakeana suspensiona kuten vesikuitususpensio. Nailonkuitususpensiolle voidaan määrittää rajajännitys ja sen näennäinen viskositeetti pienenee leikkausnopeuden kasvaessa.

Kuvassa 5.1. on esitetty maksimimomentti-menetelmän tuloksia nailonkuitususpensiolle. Alun liikkeellelähdössä momentti saavuttaa paikallisen maksimiarvon rikkoessaan kuituverkon. Kuituverkon rikkoutumisen jälkeen momentin arvo laskee alkaa vähähdellä ja ajan myötä pienentyä. Mitatuissa maksimimomenteissa on hieman eroa, mutta arvot ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa. Lopullisissa mittauksissa pyörimisnopeudet olivat välillä 2-8 rpm.



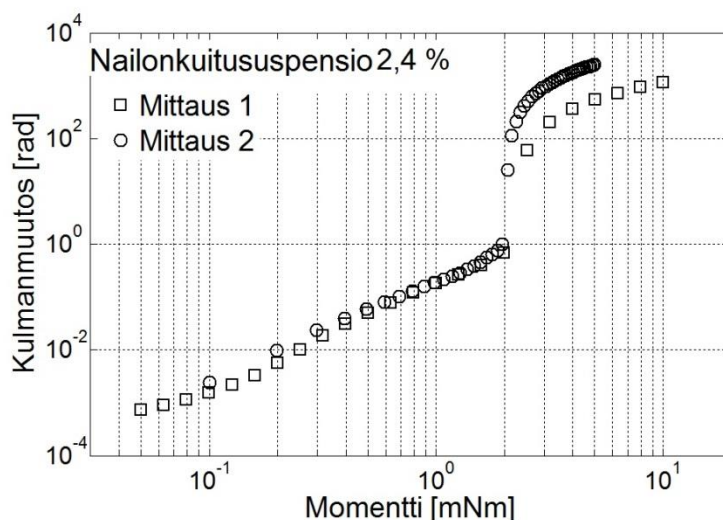
Kuva 5.1. Maksimimomentti-menetelmän momentin arvoja ajan funktiona 2,4 % 2,4 mm nailonkuitususpensiolle eri pyörimisnopeuden arvoilla

Mitatuista momenteista voitiin laskea leikkausjännityksen ja maksimimomentin arvosta saatiin rajajännitys yhtälöllä (4.3). Tulokset on esitetty kuvassa 5.2.

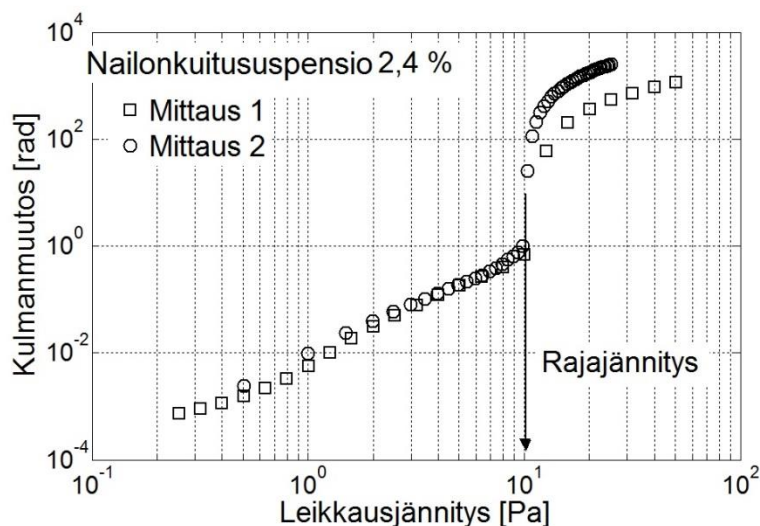


Kuva 5.2. Maksimimomentti-menetelmän leikkausjännityksen arvoja ajan funktiona 2,4 % 2,4 mm nailonkuitususpensiolla eri pyörimisnopeuden arvoilla

Myös kulmanmuutos-menetelmää testattiin nailonkuitususpensiolla. Mittaus aloitettiin hyvin pienistä momentin arvoista ja momenttia lähdettiin pikkuhiljaa kasvattamaan. Suspension lähtiessä liikkeelle kulmanmuutos kasvoi äkisti ja kyseisellä momentin arvolla voidaan olettaa, että rajajännitys ylittyi. Kuvasta 5.3. selviää kulmanmuutos momentin funktiona ja kuvassa 5.4. momentista on laskettu leikkausjännityksen ja rajajännityksen arvot yhtälöllä (4.3).



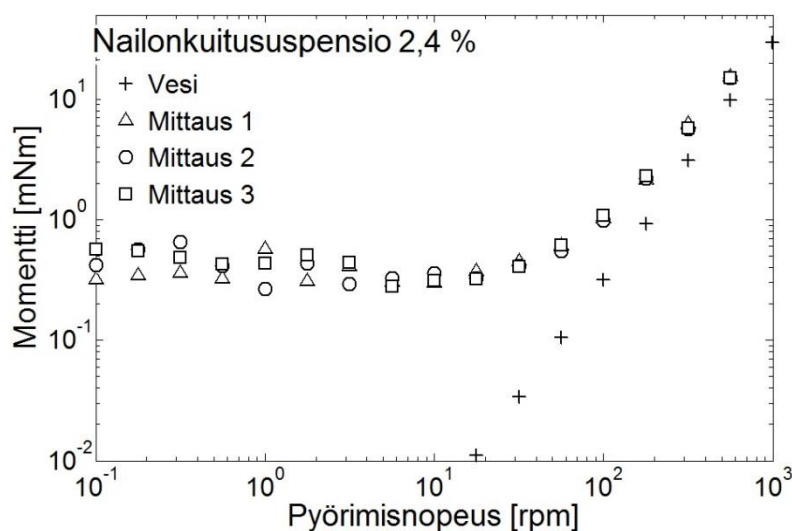
Kuva 5.3. Kulmanmuutos momentin funktiona 2,4 % 2,4 mm nailonkuitususpensiolla



Kuva 5.4. Kulmanmuutos leikkausjännityksen funktiona 2,4 % 2,4 mm nailonkuitususpensiolle

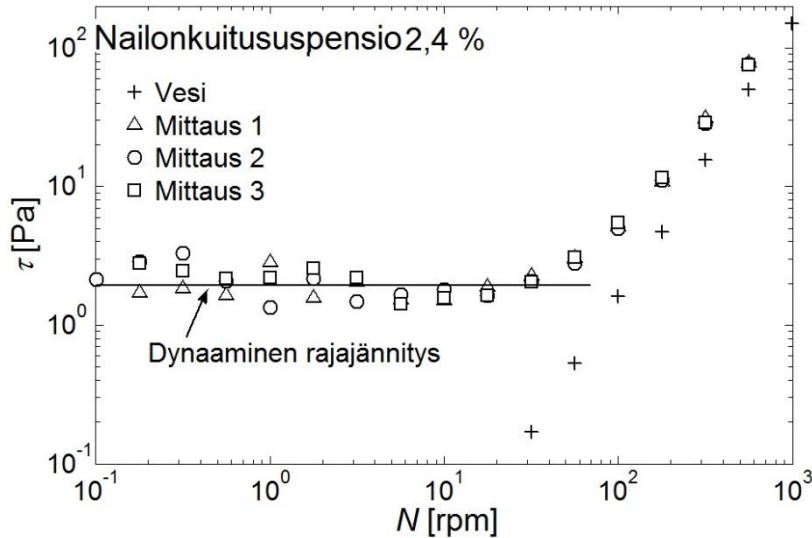
Kulmanmuutos-menetelmän toistettavuus on hyvä ja lähes kaikissa mittauksissa rinnakkaisten mittausten tulokset antoivat samoja arvoja.

Dynaamisen rajajännityksen mittausta testattiin nailonkuitususpensiolla. Tulokset 2,4 % 2,4 mm nailonkuitususpensiolle on esitetty kuvassa 5.5. Suurilla pyörimisnopeuksilla nailonkuitususpensio oli selvästi fluidisoituneessa tilassa, koska suspension virtauskäyrä käyttäytyi lähes veden käyrän tavoin. Pyörimisnopeuden laskiessa rajajännitys alkoi hallita tilannetta ja pyörimisnopeutta ~50 rpm pienemmillä arvoilla momentti pysyi lähes vakiona.



Kuva 5.5. Dynaaminen rajajännitys 2,4 % 2,4 mm nailonkuitususpensiolle pyörimisnopeuden funktiona

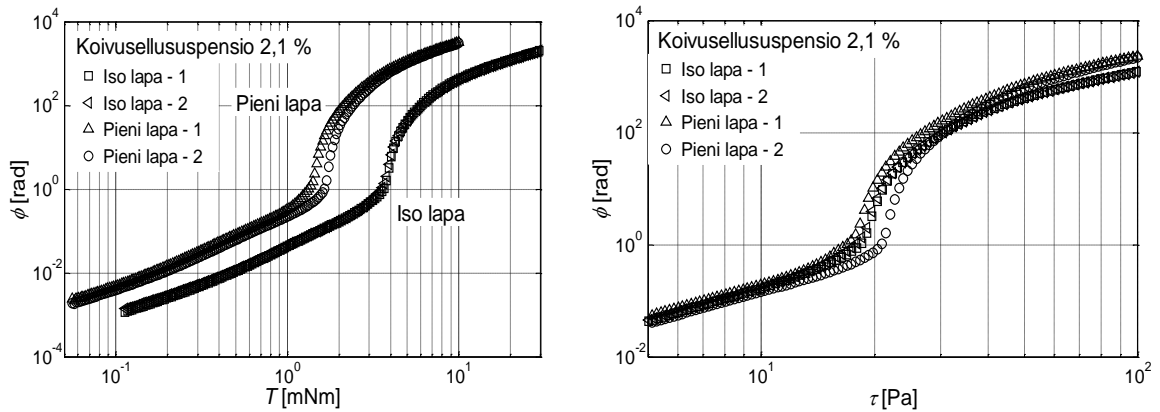
Kuvassa 5.6. on esitetty leikkausjännitys pyörimisnopeuden funktiona, mikä on laskettu yhtälöstä (4.3). Dynaamisen rajajännityksen arvo saadaan ekstrapoloimalla tasaisen alueen leikkausjännityksen arvoa pystyakselille. Kuten aiemmin mainittiin, dynaamisen rajajännityksen arvot riippuvat kuinka pitkään suspensio on ollut leikkausnopeuden alaisena, joten arvon tarkka määrittäminen ei ole mielekäästä. Dynaamisen rajajännityksen arvot ovat kuitenkin selvästi pienempiä kuin staattisen rajajännityksen arvot ja tässä tapauksessa dynaaminen rajajännitys on noin 15–25% staattisen rajajännityksen arvosta.



Kuva 5.6. Dynaaminen rajajännitys 2,4 % 2,4 mm nailonkuitususpensiolle pyörimisnopeuden funktiona

Nailonkuitususpensiossa pyöritettiin pelkkää mittavartta ja isompaa lapasysteemiä eri pyörimisnopeuksilla. Mittavarren pyörimiseen tarvittava momentti oli noin sadasosa lapasysteemin momentista. Lapasysteemin pyöriessä lapojen siivet aiheuttavat käytännössä kaiken momentin.

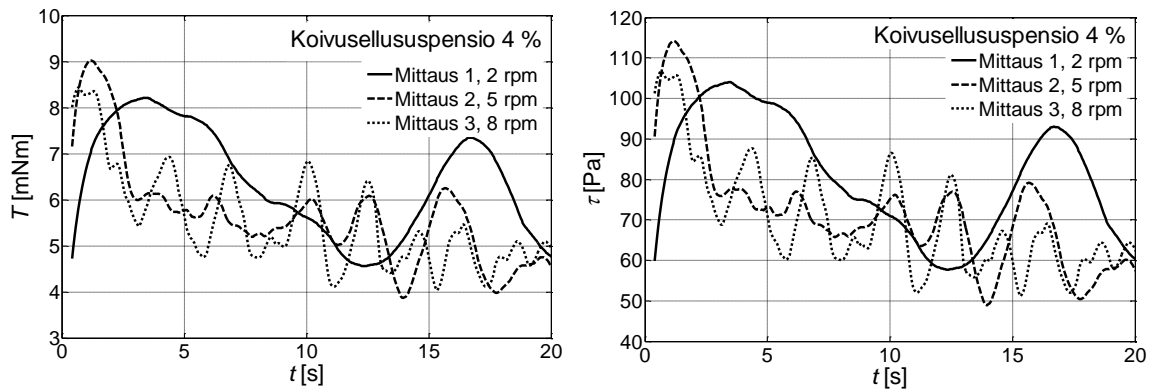
Koivulle testattiin isoa ja pientä lapasysteemiä. Erikokoiset lapasysteemit aiheuttavat pyöriessään erisuuruisen momentin. Laskettaessa kuvitteelliseen sylinteripintaan kohdistuvaa leikkausjännitystä yhtälöllä 4.3. lapasysteemit antoivat lähes saman arvon. Koivulle saavutetaan siis mittalaiteriippumattomuus pienellä ja isolla lapasysteemillä, joten mittauksia voidaan suorittaa molemmilla lapasysteemillä. Testimittausten tulokset pienellä ja isolla lavalla ovat esitetty kuvassa 5.7.



Kuva 5.7. Vasemmalla isolla ja pienellä lapasysteemillä suoritettu kulmanmuutosmittaus. Oikealla momenteista lasketut leikkausjännitykset.

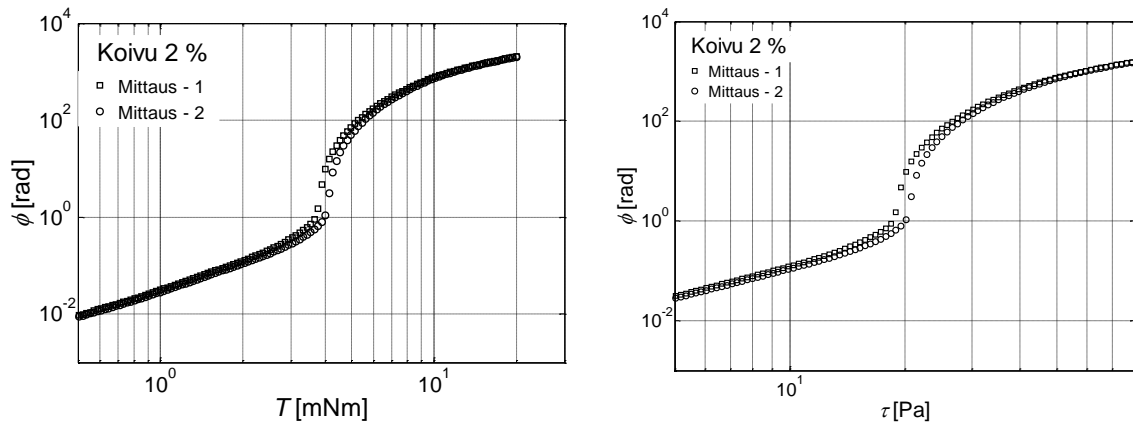
5.2 Rajajännityksen mittaus

Koivun staattisen rajajännityksen mittauksessa käytettiin isoa lapaa ja isoa säiliötä. Maksimimomentti-menetelmässä käytettiin pyörimisnopeuksia väliä 2-8 rpm. Suuremmalla pyörimisnopeudella maksimi saavutettiin aiemmin kuin pienemmällä nopeudella. Ennen jokaista mittausta suspensiota sekoitettiin voimakkaasti pyörimisnopeudella 1000–2000 rpm 60 sekunnin ajan, jotta suspensio saatiin fluidisoituneeseen tilaan. Tällä tavalla jokaiselle mittaukselle saatiin samanlainen lähtökohta. Pyörimisnopeuksien väliset maksimimomentin erot olivat pieniä. Useamman maksimimomentin arvosta laskettiin keskiarvo, jonka avulla saatiin staattisen rajajännityksen arvo. Mittauksia suoritettiin konsentraatioilla 1,2,3,4 ja 5 %. Maksimikonsentraatioksi valittiin 5 %, koska se oli sakein konsentraatio, jolla suspensio saatiin fluidisoituneeseen tilaan. 6 % suspensio oli mittalaitteelle liian paksua, koska mittausten välillä reometrin maksimimomentin arvo tuli vastaan, eikä laite enää saanut suspensiota fluidisoitua. Kuvassa 5.8. on 4 % suspensiolle maksimimomentti-menetelmän tuloksia.



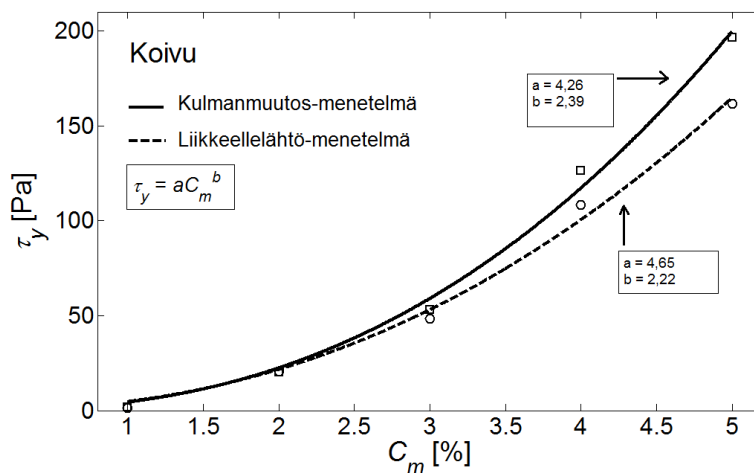
Kuva 5.8. Maksimimomentti-menetelmän momentin ja leikkausjännityksen arvoja ajan funktiona 4 % koivususpensiolle eri pyörimisnopeuksilla

Kulmanmuutos-menetelmällä mitattiin myös 1, 2, 3, 4 ja 5 % suspensioita. Kulmanmuutos-menetelmän toistettavuus oli hyvä, joten yleensä mittauksia tehtiin vain kaksi kutakin konsentraatiota kohden. Suspensio alustettiin samalla tavalla kuin maksimimomentin mittauksissa. Kulmanmuutoksen arvoista etsittiin suurin suhteellinen kulmanmuutos suhteessa edelliseen mittapisteeseen. Tämä arvo vastasi hetkeä, jolloin suspensio lähti liikkeelle eli lapasysteemi alkoi pyöriä. Tästä momentin arvosta voitiin laskea staattinen rajajännitys. Kuvassa 5.9. on esitetty 2 % suspensiolle kulmanmuutos-menetelmän tuloksia.



Kuva 5.9. Kulmanmuutos-menetelmän kulmanmuutoksen arvoja momentin ja leikkausjännityksen funktiona 2 % koivususpensiolle

Koivun liikkeellelähtö- ja kulmanmuutos-menetelmän tulokset on esitetty kuvassa 5.10. Kulmanmuutos-menetelmä antaa systemaattisesti hieman suurempia arvoja kuin maksimimomentti-menetelmä. Ero on kuitenkin melko pieni ja kulmanmuutosdatasta liikkeellelähtöhetki voitaisiin määrittää jo pienemmälle kulmanmuutokselle, jolloin myös lasketun rajajännityksen arvot pienenisivät. Mittapisteisiin on sovitettu power-law-malli ($\tau_y = aC_m^b$).

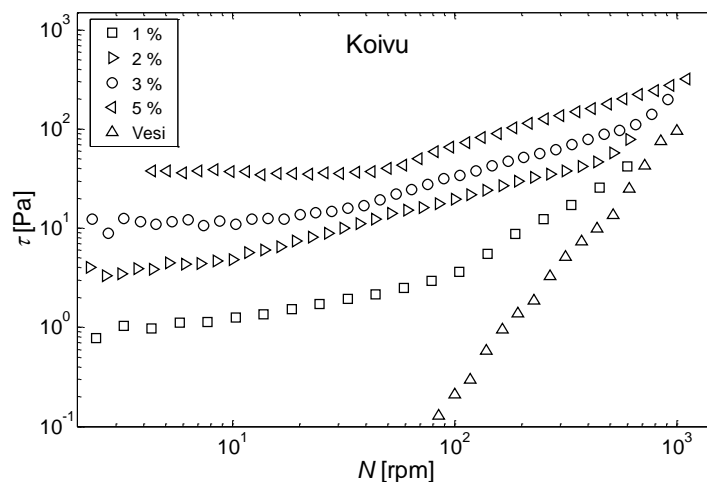


Kuva 5.10. Staattisen rajajännityksen arvoja kulmanmuutos- ja liikkeellelähtö-menetelmällä

Sovitteen voimassaoloalue on 1-5 %. Suuremmilla konsentraatioilla suspensio käyttäytynee samalla tavalla, mutta kokeellisesti tätä ei pystytty todistamaan, koska reometri ei kyennyt sekoittamaan 5 % suurempaa konsentraatiota. Tulokset ovat yhteneviä muiden tutkimusten kanssa, jotka on suoritettu vastaavilla menetelmillä (Derakhshandeh 2011 ja Mosse ja Boger 2012). Koivun lyhyt kuitupituus aiheuttaa suhteellisen pieniä rajajännitysten arvoja. Pidempikuituiset massat todennäköisesti antaisivat suurempia rajajännityksen arvoja vastaavilla konsentraatioilla.

5.3 Fluidisaation mittaus

Koivun dynaamisen rajajännityksen mittauksessa käytettiin isoa lapasysteemiä ja isoa säiliötä. Dynaamisen rajajännityksen mittauksissa havaittiin, että arvo johon rajajännitys asettuu, riippuu siitä kuinka kauan suspensio on ollut leikkausjännityksen alaisena. Mittauksista saadaan selville myös vesikuitususpension käyttäytyminen pyörimisnopeuden muuttuessa. Kuvassa 5.11. on esitetty koivususpension käyttäytymistä eri konsentraatiolla pyörimisnopeuden funktiona.

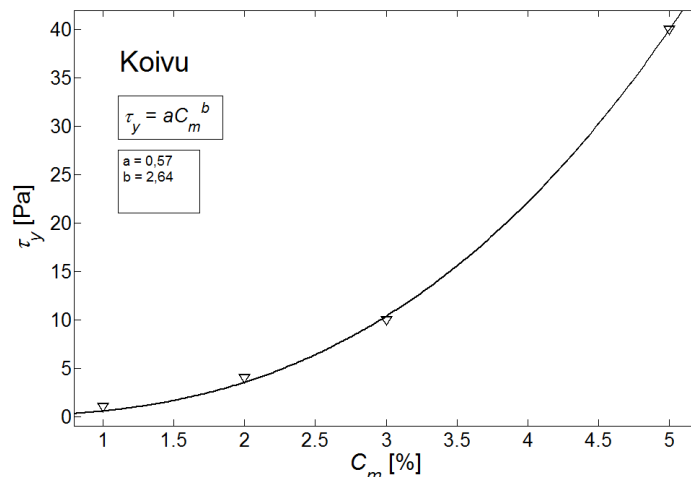


Kuva 5.11. Koivususpension leikkausjännityksen arvoja eri konsentraatiolla pyörimisnopeuden funktiona. Pyörimisnopeutta on pienennetty 5 sekunnin välein. Veden referenssikäyrä on merkattu myös kuvaan.

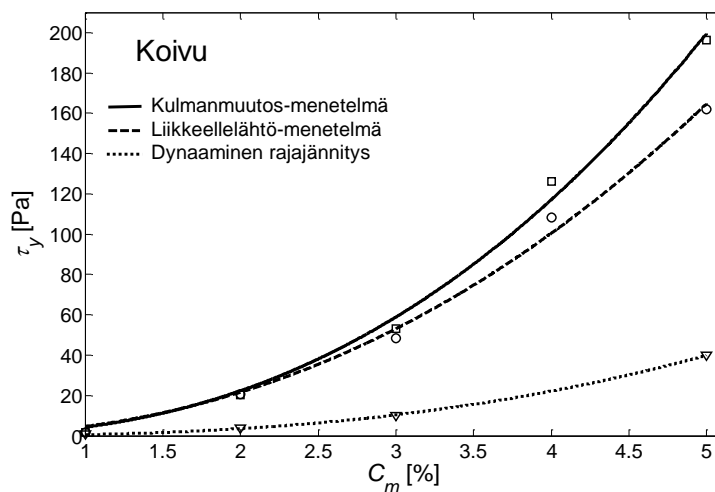
Kuvasta voidaan päätellä, että alhaisilla pyörimisnopeuksilla rajajännitys hallitsee virtaustilannetta. Konsentraatiokohtaisesti leikkausjännitys alkaa pysyä vakiona tiettyä pyörimisnopeutta pienemmillä arvoilla. Suurilla pyörimisnopeuksilla suspension virtauskäyrät lähestyvät veden referenssikäyrää. Vaikuttaa siltä, että konsentraatioerojen merkitys pienenee suurilla pyörimisnopeuksilla ja turbulenssi hallitsee tilannetta. Tästä voidaan päätellä, että suspensio on ainakin lokaalisti lapasysteemin kärkien lähetyvillä turbulentissa tilassa eli fluidisoitunut. Leikkausjännitysasteikko on logaritminen, mutta siitä huolimatta eri konsentraatioiden virtauskäyrät vaikuttavat hakeutuvan kohti veden käyrän arvoja. Reometrin maksimimomentti ei mahdollistanut mittauksia suuremmilla

pyörimisnopeuksilla. Olisi mielenkiintoista tietää, miten virtauskäyrät käyttäytyisivät vielä suuremmilla pyörimisnopeuden arvoilla.

Kuvasta 5.11. voidaan selvittää dynaamisen rajajännityksen arvot kuvassa 5.6. esitetyllä tavalla ekstrapoloimalla momentin arvot pystyakselille. Dynaamisen rajajännityksen arvot ovat aikariippuvaisia, joten kuvasta 5.11. saadut arvot pätevät vain tietylle virtaushistorialle. Dynaamisen rajajännityksen arvoja voidaan kuitenkin vertailla staattisen rajajännityksen arvojen kanssa. Kuvasta 5.11. saatiin dynaamisen rajajännityksen arvoihin on sovitettu power-law -malli ($\tau_y = aC_m^b$) ja tulokset on esitetty kuvassa 5.12. Kuvaan 5.13. on koottu staattisen ja dynaamisen rajajännityksen arvot.

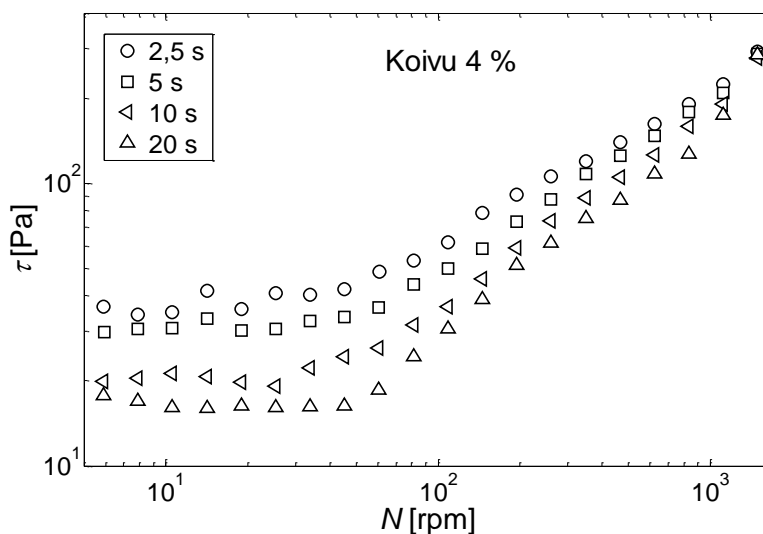


Kuva 5.12. Dynaamisen rajajännityksen arvoja 5 sekunnin aika-askeleella pyörimisnopeutta alentamalla. Kaikki mittaukset on suoritettu isommalla lapasysteemillä.



Kuva 5.13. Staattisen rajajännityksen arvoja kahdella eri menetelmällä ja dynaamisen rajajännityksen arvot yhdellä menetelmällä

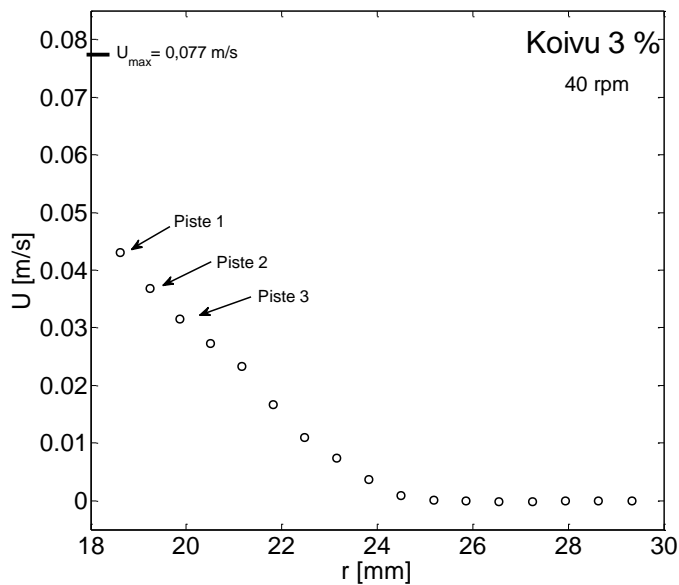
Kuvasta 5.14. nähdään, kuinka leikkausjännityksen arvo pienenee, kun suspensio on ollut pidempään leikkausjännityksen alaisena. Tämä saattaa johtua siitä, että pyörivä lapasysteemi kaivertaa itselleen hiljalleen isompaa onkaloa, jolloin lapasysteemi pump-paa kuituja ja flokkeja onkalon seinille ja lokaalisti konsentraatio laskee lapasysteemin ympärillä. Pienellä aika-askeleella suurempaa leikkausjännityksen arvoa voisi selittää sillä, että edellisen suuremman pyörimisnopeuden vaikutus näkyy edelleen mittatulok-sissa. Kuitenkin 10 ja 20 sekunnin aika-askeleilla on nähtävissä sama trendi, vaikka suspensio ehtii hidastua uuteen pyörimisnopeuteen. 4 % koivususpensiolla dynaaminen rajajännitys saa arvoja väliltä noin 15–35 Pa riippuen aika-askeleesta. Arvot vastaavat isomman lapasysteemin tuloksiin sovitetusta power-law -mallista saatua arvoa (22 Pa).



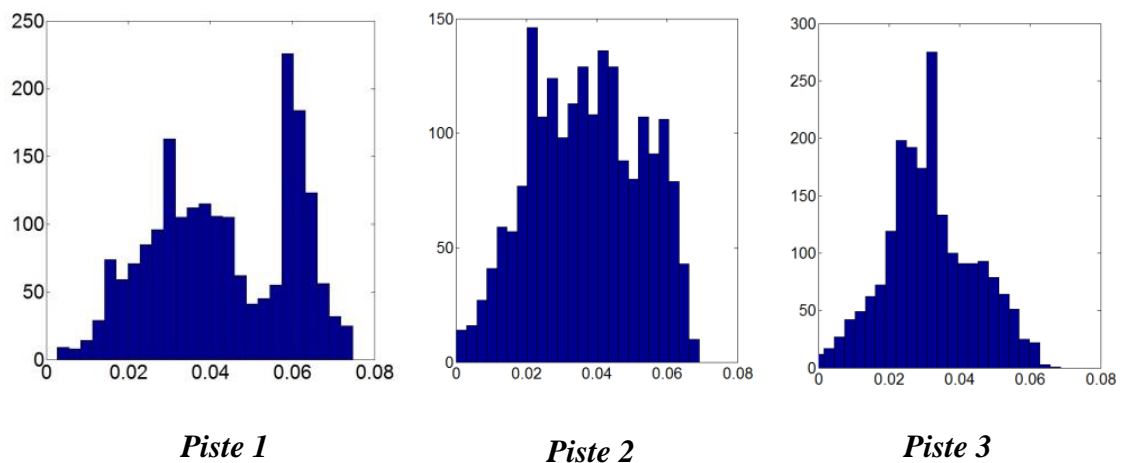
Kuva 5.14. 4 % koivususpension leikkausjännityksen arvoja eri aika-askeleella pyö-rimisnopeuden funktiona. Mittaukset on suoritettu pienemmällä lapasysteemillä.

Kuvassa 5.15. on 3 % koivususpension nopeusprofiili pyörimisnopeudella 40 rpm. Kuvaan 5.16. on merkitty kolmen ensimmäisen mittapisteen histogrammit, joista nähdään kuinka mitattujen nopeuksien jakaumat muuttuvat säteen funktiona. PUDV:n no-peusprofiilien histogrammeista huomataan, että siiven kärjen lähetyvillä tietyllä etäi-syydellä nopeus ei pysy samana 2000 mittauksen aikana. Histogrammissa on kaksi piikkiä eri nopeuksilla, toinen nopeus on siiven kärjen tangentialinopeuden suurus-luokkaa ja toinen on selvästi pienempi.

Syy tähän saattaa olla se, että lapasysteemin neljä siipeä pystyvät vain paikallisesti saattamaan suspension siiven kärjen tangentialinopeutta vastaavaan arvoon, mutta sii-pien välissä suspensio hidastuu välittömästi. Tämä selittää myös sen miksi PUDV:llä saadut keskiarvonopeudet siiven kärjen lähetyvillä ovat selvästi teoreettista maksimi-nopeutta pienemmät. Hieman kauempana siipien kärjistä histogrammi antaa yhden pii-kin, joten siipien vaikutus nopeusprofiiliin vähenee nopeasti säteen funktiona.

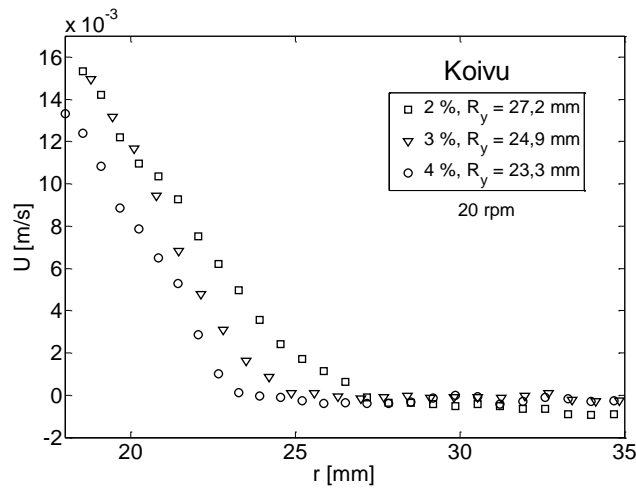


Kuva 5.15. 3 % koivususpension nopeusprofiili mitattuna PUDV:llä. Kolmesta ensimmäisestä mittapisteestä on otettu histogrammit. Siiven kärjen tangentiaalinopeus on U_{max} .

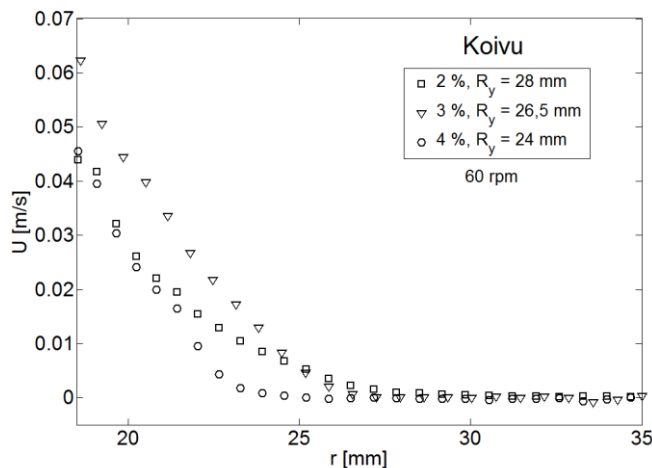


Kuva 5.16. Histogrammit kolmesta eri mittapisteestä

Mitatusta nopeusprofiilista voidaan selvittää dynaaminen rajajännitys yhtälön (4.11) avulla, kun tiedetään fluidisoituneen alueen koko ja reometrin antama momentin arvo. Fluidisoitunut alue oletettiin päättyvän kohdassa (R_y), jossa mitatun nopeuden arvo alitti ensimmäistä kertaa 1 % teoreettisesta maksiminopeudesta (U_{max}) siiven kärjessä. Kuvissa 5.17. ja 5.18. on esitetty 2, 3 ja 4 % koivususpension PUDV:llä mitatut nopeusprofiilit pyörimisnopeuksilla 20 ja 60 rpm.



Kuva 5.17. PUDV:llä mitattuja koivususpension nopeusprofileja pyörimisnopeudella 20 rpm eri konsentraatioilla. Fluidisoituneen alueen säde on ilmoitettu konsentraatiokohtaisesti.



Kuva 5.18. PUDV:llä mitattuja koivususpension nopeusprofileita pyörimisnopeudella 60 rpm eri konsentraatioilla. Fluidisoituneen alueen säde on ilmoitettu konsentraatiokohtaisesti

Alhaisemmalla konsentraatiolla fluidisoituneen alueen koko on suurempi ja suuremmalla pyörimisnopeudella alueen koko kasvaa. Taulukkoon 5.1. on listattu momentin ja leikkausjännityksen arvoja, joista rajajännitys on laskettu. Kaikissa PUDV mitauksissa käytettiin isompaa lapyysteemiä, jossa säde R_1 on 0,0185 m ja korkeus h on 0,08 m. Doppler-kulma pyrittiin asettamaan 9 asteeseen.

Taulukko 5.1. Momentin, leikkausjännityksen ja fluidisoituneen alueen koon arvoja eri konsentraatioilla ja pyörimisnopeuksilla. Rajajännitys on laskettu yhtälöllä 4.11.

C_m [%]	R_y [mm]	T [mNm]	τ_w [Pa]	τ_y [Pa]
20 rpm				
2	27,2	1,2	7	3
3	24,9	2,3	13	7
4	23,3	4,2	25	15
60 rpm				
2	28	1,9	11	5
3	26,5	2,8	16	6
4	24	4,4	25	15

Oletus, että alhaisilla pyörimisnopeuksilla rajajännitys hallitsee tilannetta, pitää paikkaansa, mutta todellisuudessa jo 20 rpm pyörimisnopeuksilla pieni alue fluidisoituu lapasysteemin ympäriltä. Dynaamisen rajajännityksen määrittäminen kuvan 5.6. tavalla ei ole täysin tarkkaa, koska lapasysteemiin kohdistuva momentti ei muodostu pelkästään rajajännityksen ylittämisestä, vaan myös pienen fluidisoituneen alueen ylläpitämisestä.

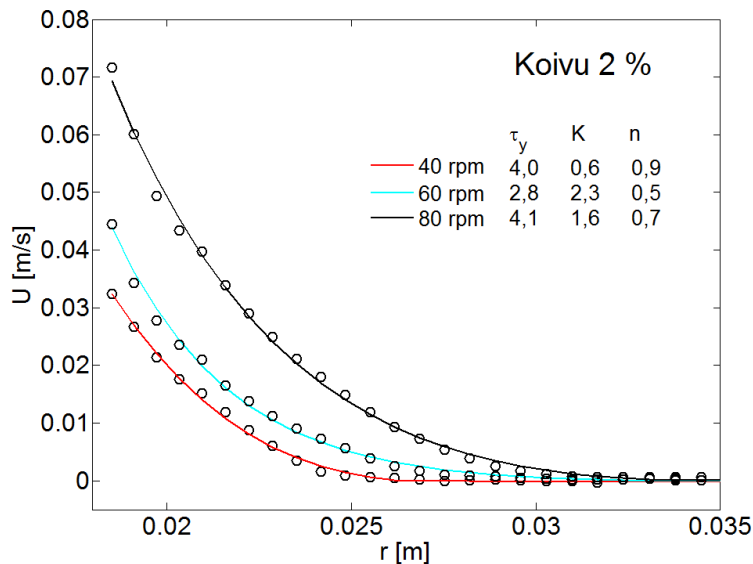
5.4 Materiaalimallin sovitus

PUDV:llä mitattuihin nopeusprofiileihin sovitettiin materiaalimallia, joka kuvaa epä-newtonisen vesikuitususpension käyttäytymistä. PUDV-laitteistolla saatiin nopeuden arvot selville eri etäisyyksillä. Vesikuitususpensiota voidaan kuvata Herschel-Bulkley (HB) -mallilla (yhtälö 2.9). Yhtälön (4.10) avulla voidaan laskea leikkausjännitys eri säteen arvoilla. Leikkausnopeuden yhtälöstä (2.2) voidaan johtaa paikallinen tangentiaalinen nopeus yhtälöiden (4.10) ja (2.9) avulla.

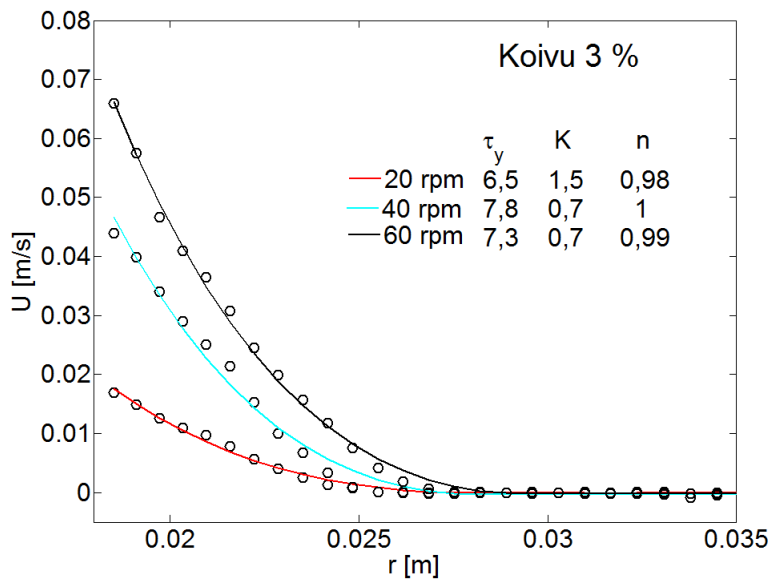
$$u(r) = U_1 - \int_{R_1}^r \left(\frac{T}{2\pi hr^2} - \tau_y \right)^{\frac{1}{n}} dr \quad (5.1)$$

missä U_1 on mitattu nopeus lapasysteemin siiven kärjessä. Optimoinnissa tämä oli muuttuja, koska mittauksissa ei pystytty selvittämään tarkasti suspension nopeutta siiven kärjessä. R_1 on lapasysteemin säde siiven kärjessä. Momentti T oli myös optimoitu muuttuja. Isoa lapasysteemiä käytettiin kaikissa mittauksissa. Säteen kasvaessa nopeus pienenee, joten leikkausnopeuden arvo on negatiivista. HB-malli olettaa leikkausnopeuden positiiviseksi, joten integraalilauseketta on kerrottu luvulla -1, jotta leikkausnopeuden arvo saatiin positiiviseksi.

Mitattuihin nopeusprofiileihin sovitettiin HB-mallia. Integraaliyhtälö 5.1. ratkaistiin jokaisessa mittapisteessä ja näin saatiin selville mallin parametrit τ_y , K ja n . Taulukon 5.1. arvoista saatiin jo hyvä alkuarvaus rajajännitykselle, τ_y , joten sitä hyödynnettiin optimoitaessa HB-mallia mittapisteisiin. Kuvassa 5.19. on esitetty 2 % koivususpension kolmeen eri pyörimisnopeuteen sovitettu HB-malli ja kuvassa 5.20. on esitetty 3 % koivususpension vastaavat sovitteet.



Kuva 5.19. HB-mallin sovitteita 2 % koivususpensioon pyörimisnopeuksilla 40, 60 ja 80 rpm

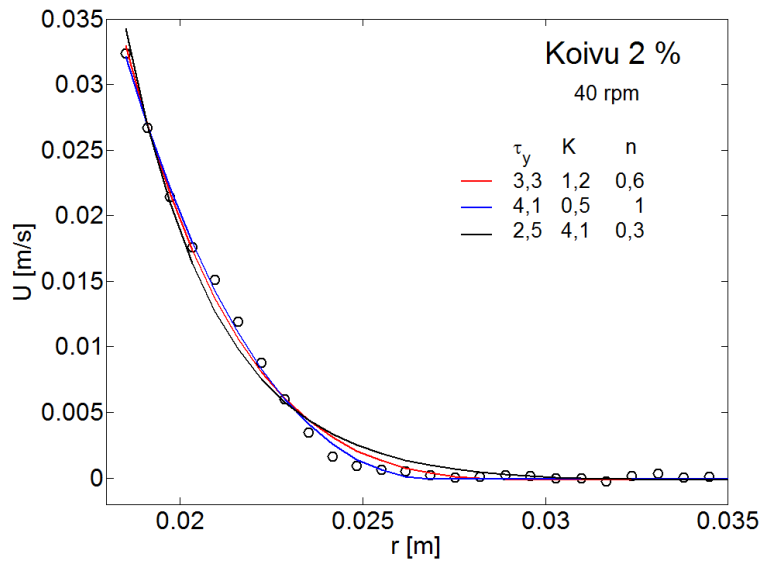


Kuva 5.20. HB-mallin sovitteita 3 % koivususpensioon pyörimisnopeuksilla 20, 40 ja 60 rpm

2 % koivususpension HB-mallin parametrien arvoissa on suurta hajontaa varsinkin $K:n$ ja $n:n$ arvon välillä. Leikkausohenevuutta kuvaava parametri n saa arvoja todella isolta väliltä. 3 % koivususpension HB-mallin parametreissa on myös hajontaa, mutta ne ovat lähempänä toisiaan kuin 2 % suspension vastaavat arvot. Leikkausohenevuuden indeksi n saa käytännössä arvon 1 kaikilla 3 % koivun eri pyörimisnopeuksilla. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että suspension käyttäytyminen ei ole lainkaan leikkausohenevaa. Kirjallisuudessa on kuitenkin yleisesti todettu koivususpension käyttäytymisen olevan leikkausohenevaa. 4 % suspension mittadata ei ollut riittävän hyvää, jotta siihen olisi voitu sovittaa materiaalimallia. Kuitenkin kaikki sovitteet osuvat visuaalisesti hyvin mittapisteisiin.

Materiaalimallin sovittamisessa on monta mahdollista virhelähdettä. PUDV-mittauksissa käytettiin äänennopeutena veden äänennopeutta 1500 m/s. Konsentraation kasvaessa suspensiossa äänennopeus saattaa muuttua konsentraation funktiona. Toisaalta lapasysteemin pyöriessä osa alueesta fluidisoituu ja osa on paikallaan jolloin suspension sisälle muodostuu paikallisesti erilaisia konsentraatioita. Äänennopeus saattaa siis myös olla PUDV:n signaalin syvyyden funktio. Tarkan äänennopeuden selvittäminen oli kuitenkin hankalaa, joten mittauksissa päädyttiin käyttämään puhtaan veden äänennopeutta. Äänennopeuden arvo vaikuttaa signaalin paikkakoordinaatin ja nopeuden arvoon. Tarkan Doppler-kulman määrittäminen oli myös epätarkkaa, virhe kulman arvossa näkyy paikkakoordinaatissa ja nopeuden arvossa. Jos mittauksissa olisi saatu mitattua suurempia nopeuksia siiven kärjen lähettyviltä eli olisi päästy lähemmäksi teoreettista maksimitangentiaalinopeutta, niin HB-mallin n parametri olisi ollut pienempi eli käyttäytyminen olisi ollut leikkausohenevampaa.

Optimointia tarkemmin tarkasteltua havaittiin, että HB-mallin parametreille on hankala löytää yksikäsitteistä ratkaisua. Riippuen parametrien alkuarvauksesta ja optimointitavasta saatiin erilaisia tuloksia. Erityisesti $K:n$ ja $n:n$ arvot vaihtelivat merkittävästi riippuen optimointialgoritmin ratkaisijasta ja parametrien alkuarvauksesta. Kuvaan 5.21. on merkitty 2 % koivususpension HB-mallin parametrejä pyörimisnopeudella 40 rpm eri optimointimenetelmiä käyttäen. Visuaalisesti kaikki kolme sovitetta osuvat melko hyvin mittapisteisiin, vaikka malleilla on selvästi eri parametrit. Tämä saattaa johtua siitä, että mittadata, johon mallia sovitetään, ei ole riittävän hyvää. Toinen mahdollinen syy on se, että HB-mallin parametrit ovat erittäin herkkiä pienellekin muutokselle alkuarvauksessa ja optimointitavassa. Yhteinen piirre on kuitenkin se, että kun $K:n$ arvo kasvaa niin $n:n$ arvo pienenee. Tämä havaitaan myös toiseen suuntaan eli $n:n$ arvon kasvaessa $K:n$ arvo pienenee. K ja n vaikuttavat olevan kääntäen verrannollisia.



Kuva 5.21. HB-mallin sovitteita eri parametreilla mittadataan

Kuvissa 5.19. ja 5.20. esitetyt koivususpension parametrit ovat yksi mahdollinen ratkaisu HB-mallin parametreiksi. Materiaalimalleista saadut rajajännitysten arvot ovat kuitenkin samaa luokkaa kuin taulukossa 5.1. listatut yhtälöllä (4.11). ratkaistut dynaamisen rajajännityksen arvot. Muita mahdollisia materiaalimalleja kuvaamaan vesikuitususpension käyttäytymistä ovat Bird-Carreau ja Binghamin plastinen malli.

Optimointiin käytettiin Matlab-ohjelmistoa ja sen tarjoamia valmiita optimointialgoritmeja. Yhtä parasta optimointimenetelmää ei löydetty. Optimoinnin nopeus ja tuloksen tarkkuus riippuivat mittaustuloksista. Toiset menetelmät vaativat hyvin tarkan alkuarvauksen, jonka selvittäminen vei aikaa. Toiset eivät onnistuneet löytämään soviteparametreille arvoa, vaikka alkuarvausta ja rajoitusehtoja muutettiin. Taulukkoon 5.2. on listattu eri optimointimenetelmien antamia tuloksia. Eri menetelmien hyvyyttä vertaillaan pienimmän neliösumman menetelmällä, missä minimoidaan residuaalien eli soviteparametrien ja aineiston pisteiden erotuksen neliöiden summaa (resnorm).

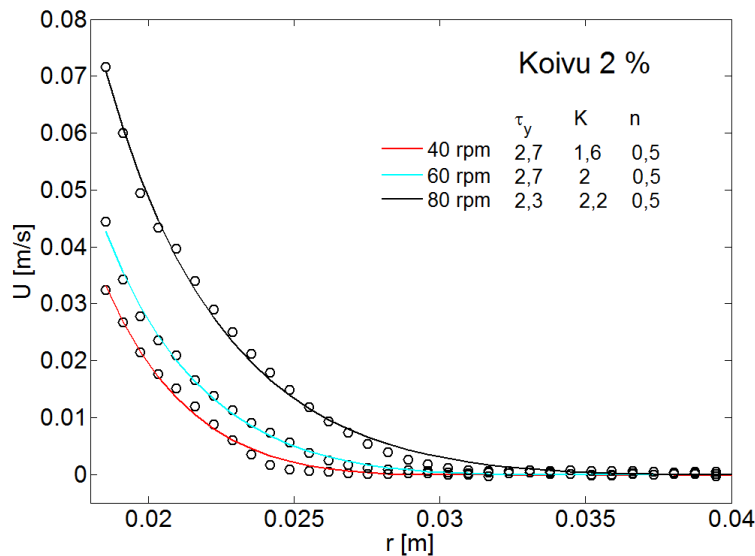
Taulukko 5.2. Optimointimenetelmien vertailua. Sovite on tehty 2 % koivuun pyörimisnopeudella 60 rpm.

Optimointimenetelmä	τ_y [Pa]	K [Pa·s ⁿ]	n	resnorm
<i>lsqcurvefit</i>	2,9	2,3	0,5	1,685e10-5
<i>fmincon(interior-point)</i>	3	2,4	0,48	1,685e10-5
<i>fmincon(sq)</i>	2,9	2,3	0,48	1,685e10-5
<i>fmincon(trust-region-ref.)</i>	1,5	1,11	0,5	1,69e10e-5

Tässä tapauksessa kolme neljästä optimointimenetelmästä onnistui löytämään lähes saman tuloksen sovitealle. Algoritmi *fmincon(trust-region-reflective)* ei löytänyt lainkaan

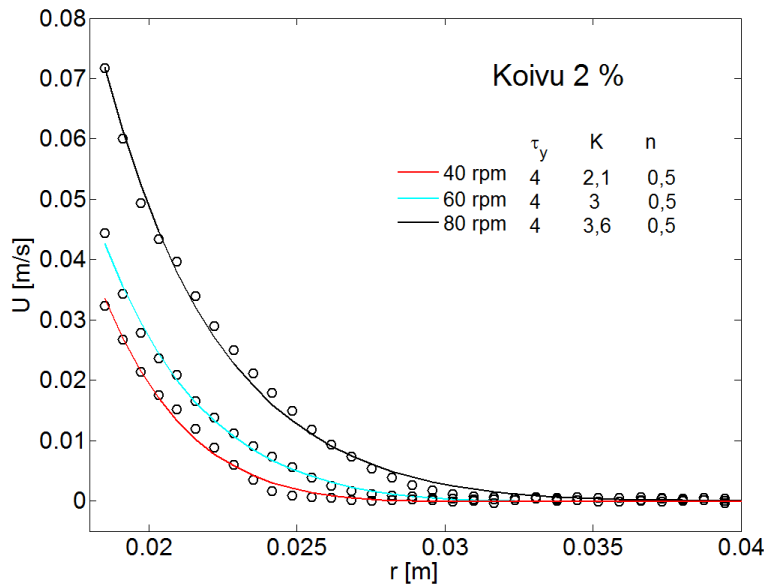
minimiä väliltä ja esimerkiksi rajajännityksen arvo löytyi välien päätepisteestä. Kaksi muuta *fmincon*-ratkaisijaa löysivät minimin väliltä, mutta vaativat melko tarkan alkuarvauksen ja ne olivat myös hitaampia kuin *lsqcurvefit*. Edellä mainittu ratkaisija *lsqcurvefit* toimi parhaiten käytettyyn mittadataan. Se ei vaatinut erityisen tarkkaa alkuarvausta toimiakseen ja oli nopeampi *fmincon*-ratkaisijoihin verrattuna.

HB-mallin parametrien havaittiin olevan herkkiä alkuarvaukselle ja keskinäiselle muutokselle sekä pyörimisnopeuskohtaisesti esimerkiksi n arvo muuttui merkittävästi. Tarkoituksena oli määrittää laajan pyörimisnopeusalueen materiaalimalli, joten n arvo kiinnitettiin optimoinnissa. Yleisesti vesikuitususpensio on todettu leikkausohenevaksi. Parametrin n arvoksi valittiin 0,5, jotta suspension käyttäytyminen saatiin leikkausohenevaksi laajalla pyörimisnopeusalueella. Tulokset on esitetty kuvassa 5.22. Visuaalisesti sovitteet näyttävät hyviltä ja *resnorm*-arvo oli luokkaa $10e-5$. Optimoinnin kannalta sovite ei kuitenkaan ollut yhtä hyvä kuin kuvassa 5.19., koska $n:n$ ei annettu vapaasti löytää parasta arvoaan.



Kuva 5.22. HB-mallin sovitteita 2 % koivususpensioon pyörimisnopeuksilla 40, 60 ja 80 rpm. Parametri n on kiinnitetty arvoon 0,5.

Dynaaminen rajajännitys on kuvan 5.22. mukaan pienempi kuin kahdella toisella tavalla selvitetty rajajännityksen arvo. Kuvasta myös nähdään, että sovitteet ennustavat suuremman fluidisoituneen alueen kuin mittaukset. Kuvan 5.12. sovitteen mukaan rajajännitys on luokkaa 3,5 Pa ja taulukkoon 5.1. kirjattujen tulosten mukaan 2 % koivun rajajännitys on noin 4 Pa. Tästä syystä optimointi suoritettiin kiinnittämällä myös rajajännityksen arvo. Rajajännitykseksi valittiin 4 Pa ja n arvona pidettiin edelleen 0,5. Optimoinnin tulokset on esitetty kuvassa 5.23. Sovitteen laatu oli edelleen heikompi kuin aiemmassa tavassa, koska nyt kaksi parametria pakotettiin tiettyyn arvoon.



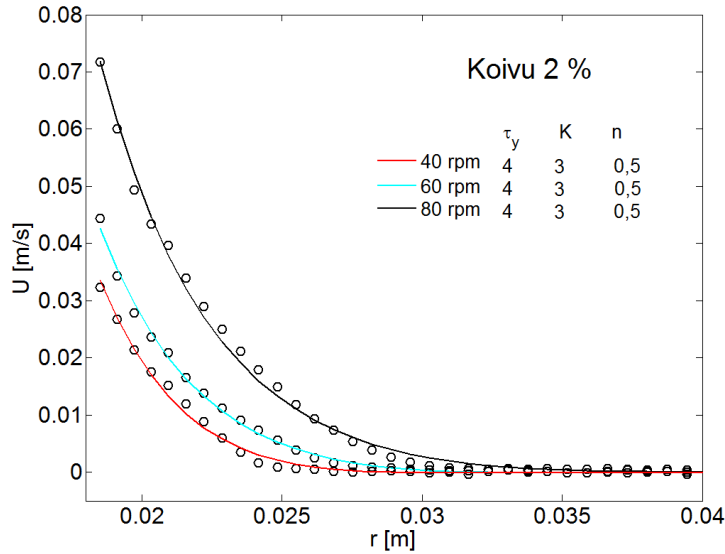
Kuva 5.23. HB-mallin sovitteita 2 % koivususpensioon pyörimisnopeuksilla 40, 60 ja 80 rpm. Parametri n on kiinnitetty arvoon 0,5 ja rajajännitys arvoon 4 Pa.

Kuvista 5.19. 5.22 ja 5.23. huomataan, että yksiselitteisiä malliparametrejä on hankala löytää. Kiinnittämällä parametrit tiettyyn arvoon saadaan tulosta pakotettua tietynlaiseksi. Parametrien kiinnityksessä pitää kuitenkin olla hyviä perusteita. Vesikuitususpensio on yleisesti todettu leikkausohenevaksi, mutta juuri arvon 0,5 valintaa on hankalampi perustella. Arvo n olisi hyvin voinut olla 0,4 tai 0,6. Rajajännityksen kiinnitykseksi oli mittatuloksia, jotka antoivat rajajännityksen arvoksi 3,5-5 Pa, joten rajajännityksen kiinnitys arvoon 4 Pa oli perusteltua.

5.5 Materiaalimallin parametrit

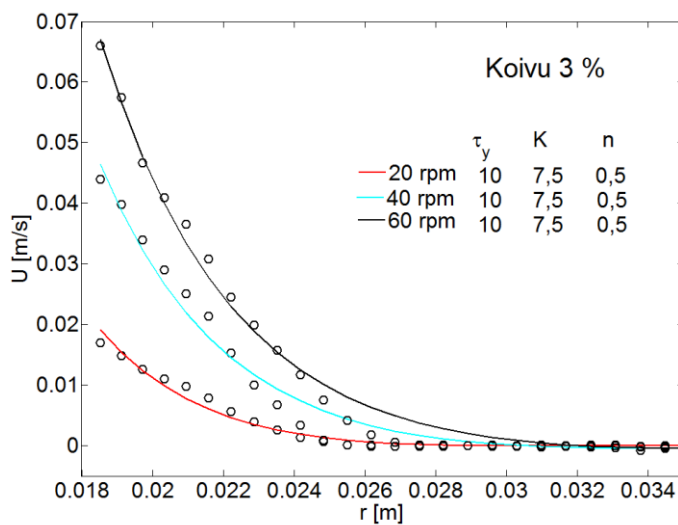
Työn tarkoituksena oli saada vesikuitususpensiolle materiaalimalli. Käyttökelpoisen materiaalimallin on kuvattava suspension käyttäytymistä mahdollisimman laajalla leikkausnopeusalueella. Yllä mainittujen epätarkkuuksien vuoksi materiaalimallien parametrit muuttuivat pyörimisnopeuden funktiona, joten tiettyjä yksinkertaistuksia oli tehtävä materiaalimallin parametrien kiinnittämiseksi.

2 % koivun tapauksessa rajajännitys otettiin dynaamisen rajajännityksen kuvan 5.12. sovitteesta. Leikkausnopeus indeksi n kiinnitettiin arvoon 0,5. Yllä olevan kuvan 5.23. perusteella K saa arvoja välitä 2,1–3,6 keskiarvon ollessa 3, joten K kiinnitettiin arvoon 3. Kuvassa 5.24. on esitetty HB-mallin sovitteet kolmelle eri pyörimisnopeuksille kiinnitetyillä parametreillä.



Kuva 5.24. HB-mallin sovitteita 2 % koivususpensioon pyörimisnopeuksilla 40, 60 ja 80 rpm. Parametri n on kiinnitetty arvoon 0,5, rajajännitys arvoon 4 Pa ja K arvoon 3.

Parametrit kiinnittämällä saadaan pyörimisnopeusriippumaton materiaalmalli koivulle. Samalla tavalla 3 % koivulle haettiin käyttökelpoisin materiaalmalli. Rajajännitys kiinnitettiin arvoon 10 Pa, joka saatiin kuvan 5.12. sovitteesta. Leikkausnopeus indeksi n kiinnitettiin arvoon 0,5. Näillä arvoilla parametri K sai optimoinnissa arvoja väliltä 4-9 pyörimisnopeudesta riippuen. K päätettiin kiinnittää arvoon 7,5, koska se oli K :n arvojen keskiarvon suuruusluokkaa ja yhtenevä 2 % koivun parametrien kanssa ollessa $\frac{3}{4} \tau_y$. Kuvassa 5.25. on HB-mallin sovitteet kiinnitettyillä parametreillä 3 % koivulle.



Kuva 5.25. HB-mallin sovitteita 3 % koivususpensioon pyörimisnopeuksilla 20, 40 ja 60 rpm. Parametri n on kiinnitetty arvoon 0,5, rajajännitys arvoon 10 Pa ja K arvoon 7,5.

Kuvassa 5.25. sovitteet ennustavat fluidisoituneen koon alueen suuremmaksi kuin mittauksissa, mutta virtaavassa alueessa sovitteet osuvat hyvin mittapisteisiin. *Resnorm*-arvo oli 3 % sovitteissa luokkaa $10e-4$.

Käyttökelpoisen materiaalmallin saamiseksi oli tehtävä paljon oletuksia ja yksinkertaistuksia. Nämä toivat osaltaan malliin epätarkkuutta, mutta laadullisesti malli onnistui kuvaamaan vesikuitususpension käyttäytymistä. Malli ei yksinään sovellu prosessilaitteiden mitoitukseen, koska tarkkoja arvoja ei onnistuttu määrittämään. Työssä suoritettujen mittausten perusteella koivususpension materiaalmalliksi ehdotetaan Herschel-Bulkley-mallia, jonka parametrit saadaan taulukosta 5.3. Rajajännityksen laskentaan käytetään dynaamisen rajajännityksen sovitetta kuvasta 5.12.

Taulukko 5.3. HB-mallin parametrit koivulle eri konsentraatioilla. Konsentraation C_m arvo annetaan prosentteina.

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_y + K\dot{\gamma}^n$$

τ_y	K	n
$0,57 \cdot (C_m[\%])^{2,64}$	$\frac{3}{4} \cdot \tau_y$	0,5

5.6 Canadian Standard Freeness ja Schopper Riegler

Koivususpension Canadian Standard Freeness (CSF) ja Schopper Riegler ($^{\circ}$ SR) arvot mitattiin. Valmistajalta saatiin alkuperäiset CSF- ja $^{\circ}$ SR-arvot ennen kuivausta, mutta mittauksissa käytetty sellu valmistettiin selluarkeista käsin pulpperoimalla. Tästä syystä haluttiin selvittää vastaavatko mittauksissa käytetyn sellun ominaisuudet alkuperäisiä arvoja. Mittausten perusteella koivun CSF-arvo oli noin 650 ml valmistajalta saadun arvon ollessa 600 lm. Koivun $^{\circ}$ SR-arvo mittausten mukaan oli 14 valmistajan antaman arvon ollessa 16. Arvot ovat samaa suuruusluokkaa, joten käsin pulpperoinnilla päästiin melko lähellä alkuperäisiä olosuhteita.

Koivulle tehdyistä mittauksista saatiin selville myös muita ominaisuuksia. Koivun kuitupituudeksi saatiin pituus-painotetulla keskiarvolla 0,77 mm ja paino-painotetulla keskiarvolla 0,9 mm. Koivukuitujen *Curl*-arvo oli 13,7 %.

6 VIRTAUKSEN NUMEERINEN LASKENTA

Tämän kappaleen tavoitteena on selvittää kuinka lähellä CFD-laskennan tulokset ovat mittauksista ja soviteista saatuja tuloksia. Malliparametrien saamiseksi jouduttiin tekemään tiettyä yksinkertaistuksia ja oletuksia, joten tarkkaan mitoitukseen laskentaa ei voida vielä hyödyntää. Saatujen tulosten avulla voidaan kuitenkin suorittaa kvalitatiivinen vertailu laskennan, mittausten ja soviteen välillä.

6.1 Laskentageometria ja reunaehdot

Laskenta suoritettiin Ansys CFX 14.5-ohjelmistolla. Numeerista laskentaa varten mallinnettiin $\frac{1}{4}$ isosta säiliöstä ja isommasta lapasysteemistä. Laskenta-alue on esitetty kuvassa 6.1. Laskenta suoritettiin laminaarina. Mallista jätettiin häiriölevyt pois laskennan helpottamiseksi. Häiriölevyjen tarkoitus oli estää suspension seinäliukumaa säiliön ulkoseinällä. Mittausten aikana todettiin visuaalisesti, että häiriölevyt pysäyttivät virtauksen säiliön ulkoseinille. Säiliön seinille voitiin siis asettaa *no-slip wall*-reunaehto. Nesteen ja ilman rajapinnalle asetettiin *free-slip*-reunaehto. Sylinterin leikkauspinoille asetettiin periodinen reunaehto siten, että toisesta seinästä ulosmenevä virtaus tulee toisesta sisään. Laskenta-alueeseen luotiin yksi verkko ja se laitettiin pyörimään lähdetermillä, jolloin lapasysteemi pyöri. Yksiosaisen verkon käyttö todettiin laskennallisesti nopeammaksi kuin kaksiosainen verkko, jossa oli pyörivä alue lapasysteemin ympärillä ja paikallaan oleva alue muualla. Seinille asetettiin *counter-rotating wall*-reunaehto, jolloin pyörivään laskenta-alueeseen nähden seinät pysyivät paikallaan.

Laskenta-alueeseen luotiin tetraedriverkko, joka koostui 450 000 elementistä (kuva 6.1.). Lapasysteemin ympäristöön tehtiin rajakerrostihennys, jotta nopeasti muuttuvien suureiden laskenta saatiin mahdollisimman tarkaksi. Laskentaverkon *Skewness*-luvun keskiarvo on 0,24 maksimin ollessa 0,88. Ideaaliverkon *Skewness*-luvun keskiarvon tulisi olla mahdollisimman lähellä nollaa, joten käytetty verkko on hyvälaatuinen.

Materiaalimallina käytettiin HB-mallia (yhtälö 2.9), jonka parametrit saatiin taulukosta 5.3. Vesikuitususpension mallintamiseen voidaan myös käyttää Bird-Carreau mallia. Laskennan kannalta Bird-Carreau-malli on miellyttävä, koska nollaleikkaus viskositeetti ei salli viskositeetin kasvaa rajatta. Toisaalta malli ei ota huomioon vesikuitususpension rajajännitystä.

Reynoldsin lukua (Re) arvioitiin käyttämällä Metzner-Otto postulaattia, joka määrittää efektiivisen leikkausnopeuden seuraavalla tavalla:

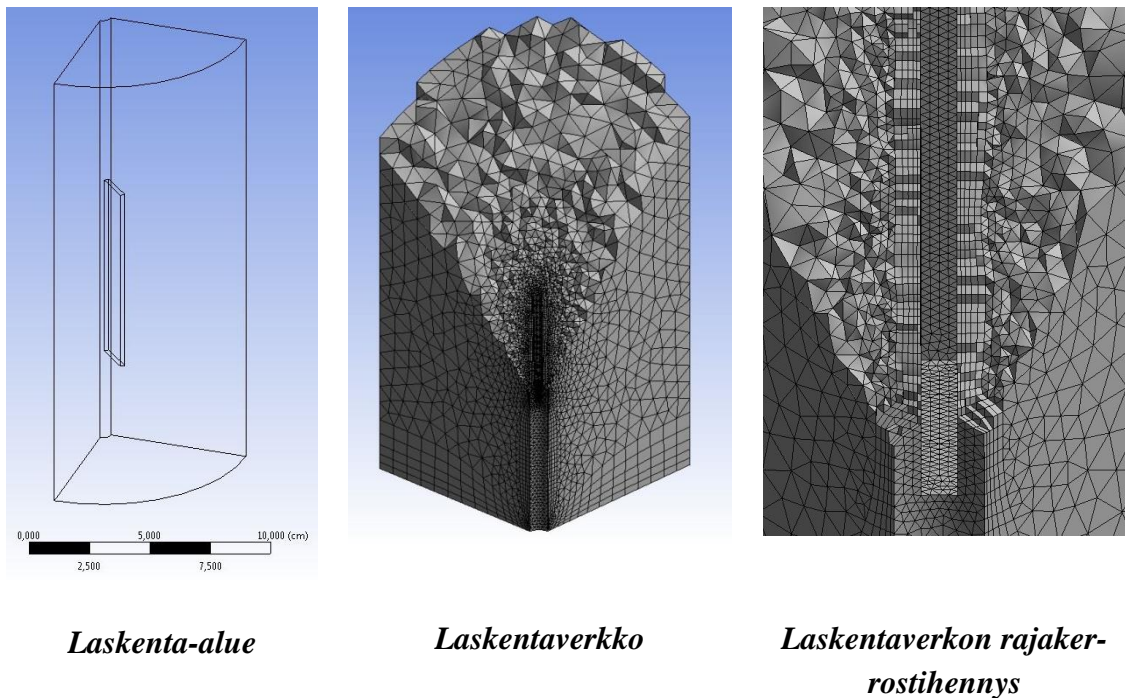
$$\dot{\gamma}_e = k_s N \quad (6.1)$$

missä k_s on sekoittimen leikkausnopeusvakio ja N pyörimisnopeus (1/s). Vakio k_s saa yleensä arvoja väliltä 10–13 riippuen sekoittimen tai potkurin tyypistä ja koosta. Tässä k_s arvona käytettiin 11. Vaikka työssä käytetty lapasysteemi ei ole puhdas sekoitin, sovelletaan Reynoldsin luvun laskennassa tätä menetelmää. Tarkoituksena on saada suuruusluokka-arvio Reynoldsin luvusta ja virtauksen tilasta. Reynoldsin luku saadaan yhtälöstä

$$Re = \frac{\rho N D_l^2}{\mu_e} \quad (6.2)$$

missä ρ on suspension tiheys (kg/m^3) D_l lapasysteemin halkaisija ja efektiivinen viskositeetti μ_e (Pa) saadaan laskettua käytetyn materiaalimallin leikkausjännityksen avulla ottaen huomioon, että $\dot{\gamma}_e = k_s N$. Pyörimisnopeuden ollessa luokkaa 100 rpm 2 % koi-vususpensiolla Reynoldsin luku on noin 5, jolloin virtaus on selvästi laminaari ($Re < 25$). Tästä voidaan päätellä, että alhaisilla pyörimisnopeuksilla (~200 rpm) virtaus voidaan laskea laminaarina. (Adams 2007)

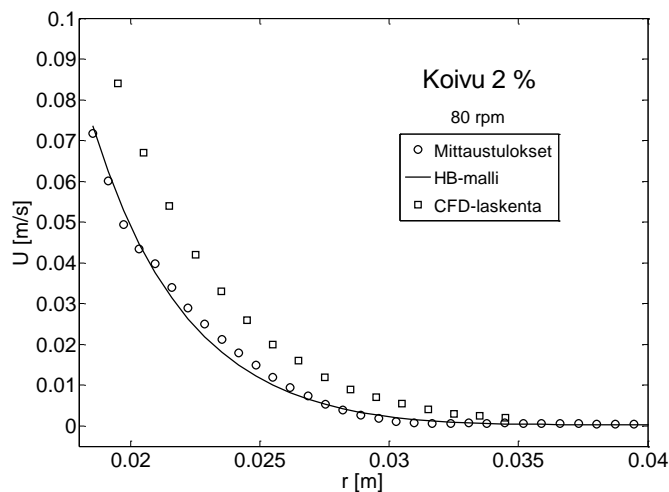
Konvergenssirajana laskennassa oli $10e-6$. HB-mallissa mallissa käytettiin *minimum* ja *maximum shear strain rate* arvoina CFX:n oletusarvoja, jotka olivat $10e-3$ ja $10e3$.



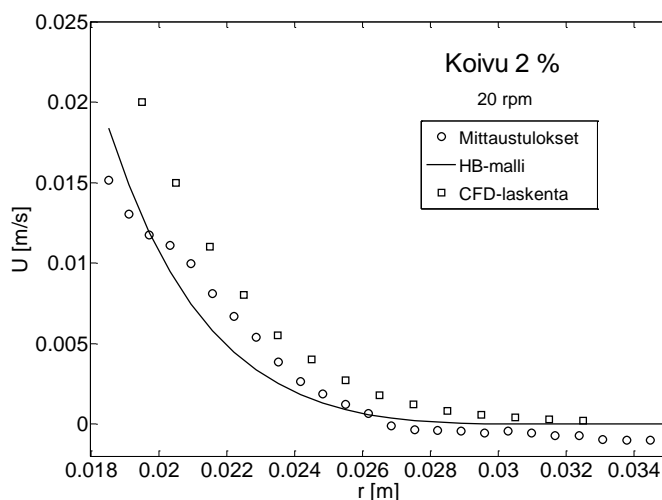
Kuva 6.1. Vasemmalla laskenta-alue, keskellä poikkileikkaus laskentaverkosta ja oikealla tarkennus laskentaverkon rajakerrostihennykseen

6.2 Tulokset ja niiden arviointi

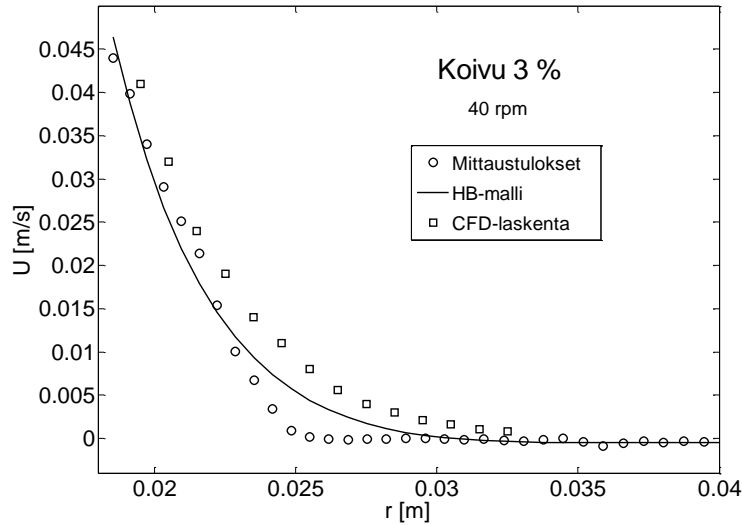
Materiaalimallina käytettiin HB-mallia (yhtälö 2.9), jonka parametrit saatiin taulukosta 5.3. Mittauksista saatuja ja CFD:llä laskettuja nopeuksia vertailtaessa havaittiin, että CFD-laskenta antaa selvästi suurempia nopeuksia ja ennustaa fluidisoituneen alueen suuremmaksi kuin mittauksissa. Aiemmin jo todettiin, että siiven kärjen lähetyvillä nopeutta ei pystytty mittaamaan tarkasti. Tämä saattaa selittää sen, miksi mitatut nopeudet ovat laskennalla saatuja nopeuksia pienempiä. Fluidisoituneen alueen koko pystyttiin selvittämään mittausten avulla melko tarkasti, mutta laskenta antaa selvästi isompia fluidisoituneen alueen kokoja. Nopeusprofiilien muoto on kuitenkin sama, vaikka arvot poikkeavat toisistaan. Tästä voisi päätellä, että mallin rajajännityksen arvo on liian pieni. Kuviin 6.2.–6.4. on koottu mittaus- ja laskentatulosten vertailua eri materiaalimalleilla ja eri pyörimisnopeuksilla.



Kuva 6.2. Mittaustulosten ja laskennan vertailua 2 % koivulle 80 rpm. Materiaalimallina HB-malli parametreina: $\tau_y=4$ Pa, $K=3$ Pa·s ja $n=0,5$.



Kuva 6.3. Mittaustulosten ja laskennan vertailua 2 % koivulle 20 rpm. Materiaalimallina HB-malli parametreina: $\tau_y=4$ Pa, $K=3$ Pa·s ja $n=0,5$.



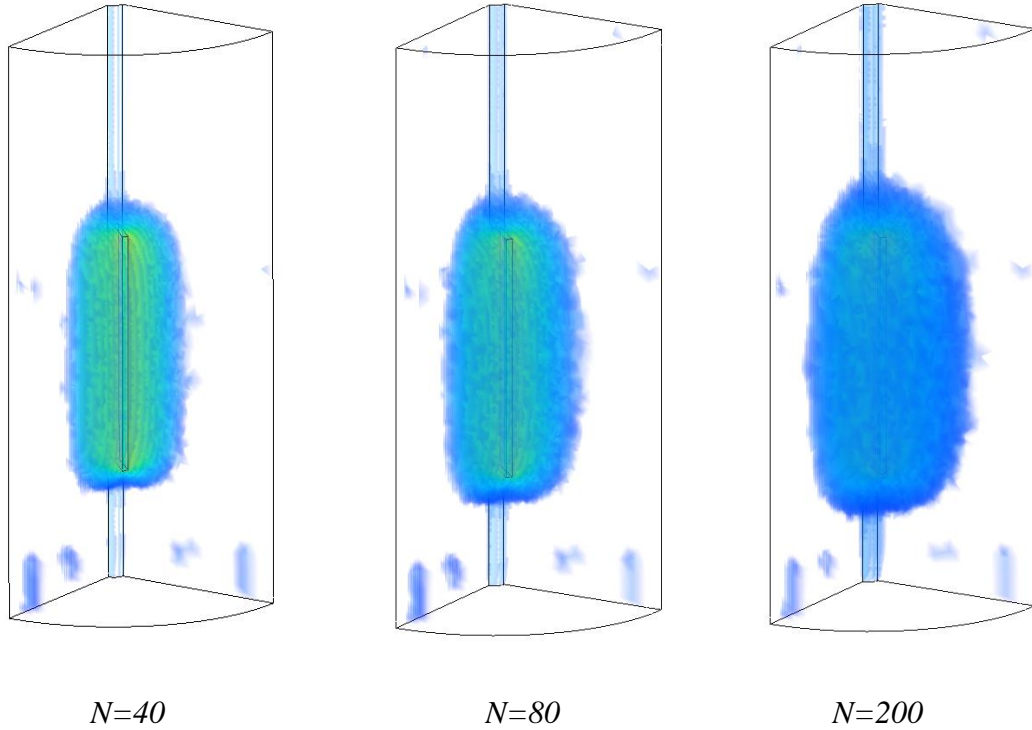
Kuva 6.4. Mittaustulosten ja laskennan vertailua 3 % koivulle 40 rpm. Materiaalimallina HB-malli parametreina: $\tau_y=10$ Pa ja $7,5$ K Pa·s ja $n=0,5$.

Laskennasta saadut tulokset olivat kaikissa kolmessa esimerkkitapauksessa selkeästi reometrin arvoja suurempia. Reometrin antaman momentin arvo pieneni ajan kuluessa. Tarkka momentin arvo oli hankalaa määrittää, koska PUDV-mittaus saattoi kestää 3 minuuttia, minkä aikana momentin arvo oli ehtinyt muuttua. Mittauskohtaisesti momentille pyrittiin määrittämään keskiarvo. Taulukkoon 6.1 on merkitty mittauksista ja laskennasta saadut momentit. Ero on laskettu suhteessa mitattuun momenttiin.

Taulukko 6.1. Mittausten ja laskennan momentin vertailua kolmessa eri esimerkkitapauksessa

	2 % 80 rpm	3 % 40 rpm	2 % 20 rpm
Mittaustulokset [mNm]	2,4	2,9	1,2
CFD-laskenta [mNm]	4,4	8,7	2,8
Ero [%]	83	200	133

Laskennasta saatiin selville fluidisoituneen alueen koko ja muoto. Fluidisoitunut alue oletettiin päättyvän, kun nopeus laskee alle 5 % teoreettisesta maksiminopeudesta siiven kärjessä. Kuvassa 6.5. on 3 % koivususpension fluidisoitunut alue pyörimisnopeuksille 40, 80 ja 200 rpm.



Kuva 6.5. Lapasysteemin ympäriltä fluidisoitunut alue 3 % koivulle pyörimisnopeudella 40 rpm ja 80 rpm ja 200 rpm

Aiemmin todettiin, että laskenta ennusti fluidisoituneen alueen suuremmaksi kuin mittauksissa. Laskennasta saatu fluidisoituneen alueen koko saattaa siis olla liian suuri. Laadullisesti alueen koko ja muoto vaikuttavat kuitenkin järkeviltä. Rajajännitysaineena vesikuitususpension tiedetään muodostavan sisälleen onkalon, jossa suspensio virtaa lapasysteemin pyöriessä. Laskennan mukaan pyörimisnopeuden kasvaessa fluidisoituneen alueen koko kasvaa.

7 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia vesikuitususpension virtausominaisuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Lopullisena tavoitteena oli määrittää vesikuitususpensiolle materiaalimalli. Tätä varten rakennettiin mittalaitteisto, jonka suunnittelussa hyödynnettiin alalla viime aikoina tehtyjä tutkimuksia. Mittalaitteiston pyörivät lapasysteemit valmistettiin ABS-muovista 3D-tulostimella. Lapasysteemit soveltuivat hyvin vesikuitususpension mittauksiin ja niiden suurimpina etuina olivat muokattavuus, valmistuksen nopeus ja alhaiset kustannukset.

Vesikuitususpension tärkein yksittäinen ominaisuus, staattinen rajajännitys, määritettiin hyvin kahdella eri menetelmällä. Menetelmien tulokset olivat samaa suuruusluokkaa ja mittausten toistettavuus oli hyvä. Iso ja pieni lapasysteemi antoivat saman rajajännityksen arvon, joten tulokset olivat mittalaiteriippumattomia. Mittauksista saatiin selville, että staattisen rajajännityksen arvo kasvaa epälineaarisesti konsentraation funktiona. Dynaaminen rajajännitys havaittiin olevan aikariippuvainen. Mitä kauemmin suspensio on ollut liikkeessä, sitä alhaisempi on dynaamisen rajajännityksen arvo. Tarkkaa dynaamisen rajajännityksen arvoa oli hankala määrittää, koska se riippui virtaushistoriasta. Liikkeelle saatu vesikuitususpensio ei pysähtynyt tehon pysyessä vakiona, koska dynaamisen rajajännityksen arvot olivat selvästi pienempiä kuin staattisen rajajännityksen. Havaittiin myös, että liikkeellelähdon jälkeen leikkausjännitystä voitiin laskea virtauksen pysähtymättä. Alhaisilla pyörimisnopeuksilla rajajännitys hallitsi virtausta. Suurilla pyörimisnopeuksilla suspension virtauskäyrät lähestyivät veden käyrää. Turbulenssi hallitsi tilannetta ja konsentraatioerojen vaikutus väheni.

PUDV-laitteistolla pyrittiin määrittämään vesikuitususpension nopeusprofiileita eri konsentraatioiselle koivulle eri pyörimisnopeuksilla. Mittaukseen liittyi monta virhelähdettä, jotka osaltaan toivat epätarkkuutta mittatuloksiin. Koivun tapauksessa 2 % ja 3 % suspensioista saatiin melko hyviä tuloksia, mutta 4 % suspensiossa ultraäänisignaalin voimakkuus heikkeni selvästi. Mitattujen nopeusprofiilien avulla saatiin kuitenkin selvitettyä fluidisoituneen alueen kokoja. Nopeusprofiileihin sovitettiin HB-mallia, mistä saatiin selville mallin parametrit. HB-mallin parametrit muuttuivat pyörimisnopeuden muuttuessa, joten oletuksia ja yksinkertaistuksia oli tehtävä materiaalimallin määrittämiseksi. Pakottamalla leikkausnopeus indeksi n arvoon 0,5 ja asettamalla rajajännityksen arvoksi mitattu dynaamisen rajajännityksen arvo saatiin hyvä sovite. Edelleen kiinnittämällä $K:n$ arvo saatiin pyörimisnopeusriippumaton materiaalimalli. Näillä muutoksilla soviteen laatu hieman heikkeni, mutta näin saatiin selville käyttökelpoinen ja todennukainen vesikuitususpension käyttäytymistä kuvaava malli. 2 % ja 3 % koivus-

pension tuloksista kehitettiin yleinen yhtälö, josta saadaan selville HB-mallin parametrit muillekin koivun sakeuksille.

Epänewtonista materiaalmallia käytettiin virtauslaskennassa. Laskenta ennusti fluidisoituneen alueen koon hieman suuremmaksi kuin mittauksissa. Lisäksi paikalliset nopeudet olivat laskennassa suurempia kuin mittauksissa. Nopeusprofiilit olivat kuitenkin samanmuotoisia, joten ero saattoi johtua rajajännityksestä. Laskennasta saadut momentin arvot olivat selvästi suurempia kuin mittauksissa. Toisaalta mittauksista saatu momentin arvo oli epätarkka, koska momentti muuttui ajan funktiona. Vaikuttaa siltä, että laskennalla saadaan kuvattua vesikuitususpension kvalitatiivista käyttäytymistä hyvin, mutta tarkkojen arvojen määrittäminen ei ollut luotettavaa.

Vesikuitususpensiolle ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyä materiaalmallia. Epänewtoniset materiaalmallit pystyvät kuvaamaan suspension käyttäytymistä, mutta ne vaativat aina kokeellista dataa. Tässä työssä selvitetty materiaalmalli parametreineen antaa mahdollisuuden mallintaa suspension todellista käyttäytymistä prosessilaitteiden sisällä CFD-laskennalla. Tähän mennessä laitteita on laskettu vedellä. Mallia voidaan hyödyntää teollisuuden prosessilaitteiden käyttäytymisen ymmärtämiseksi, mutta tarkkuutensa puolesta se ei vielä sovellu laitteiden mitoitukseen. CFD-laskennan avulla voidaan prosessilaitteiden sisältä saada informaatiota, jonka mittaaminen olisi haastavaa tai jopa mahdotonta.

Työssä onnistuttiin selvittämään tarkasti ja luotettavasti vesikuitususpension rajajännitys. Mittatulosten avulla koivulle kehitettiin pyörimisnopeusriippumaton materiaalmalli, jonka parametrit voidaan selvittää konsentraatiokohtaisesti. Jatkotutkimuksen kohteena voisi olla erilaiset kuitutyypit, esimerkiksi erittäin lyhyt- ja pitkäkuituisen suspension rajajännitys ja nopeusprofiilit olisivat mielenkiintoisia tietoja, koska kuitupituuden on todettu vaikuttavan merkittävästi rajajännityksen arvoon. PUDV-mittajärjestelyä pitäisi kehittää, jotta saataisiin tarkempia ja luotettavampia mittatuloksia. Lapasysteemissä voisi olla enemmän siipiä, jotta paikallinen nopeus ei ehtisi laskea siipien välissä. Näillä parannuksilla voitaisiin saada tarkempia nopeusprofiileita, joista voitaisiin määrittää parempi ja tarkempi reologinen malli vesikuitususpensiolle.

LÄHDELUETTELO

- Adams, L.W., Barigou, M. "CFD-Analysis of caverns and pseudo-caverns developed during mixing of non-Newtonian fluids." *Chemical Engineering* 85(A5), 2007: 598-602.
- Ahlstedt, H. *Kitkallinen virtaus*. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1998.
- Ahonen, M. *Puukuitususpension suotautumisen kokeellinen mittaus, Pro gradu - tutkielma*. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, 2013.
- AntonPaar. "Physica MCR, The modular Rheometer Series." By Anton Paar GmbH. 2008.
- Barnes, H. A. "Thixotropy: a review." *Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics* 70 (1-2), 1997: 1-33.
- Bennington, C. P. J., Azevedo, G., John, D. A., Birt, S. M., Wolgast S. W. "The yield stress of medium and high consistency mechanical pulp fibre suspensions at high gas content." *Journal of Pulp and Paper Science* 21(4), 1995: 111-118.
- Bennington, C. P. J., Kerekes, R. J. "Power requirements for pulp suspension fluidization." *Tappi Journal Vol. 79 nro. 2*, 1996: 253-258.
- Bennington, C. P. J., Kerekes, R. J., Grace J. R. "The yield stress of fibre suspensions." *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1990: 748-757.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot E. N. *Transport Phenomena, Second Edition*. John Wiley & Sons, 2001.
- Burges, J. M. *Second report on viscosity and plasticity*. Amsterdam: North Holland Pub, 1938.
- Buscall, R. *Letter to the Editor: Wall slip in dispersion rheometry*. Exeter: Journal of Rheology, 2010.
- Chhabra, R. P. *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*. Oxford: Elsevier, 2008.
- Dalpke, B., and R. J. Kerekes. "The influence of fibre properties on the apparent yield stress of flocculated pulp suspensions." *Journal of Pulp and Paper Science* 31(1), 2005: 39-43.
- Damani, R., Powell, R. L., Hagen, N. "Viscoelastic characterization of medium consistency pulp suspensions." *Canadian Journal of Chemical Engineering* 71(5), 1993: 676-685.
- Derakhshandeh, B., Kerekes, R. J., Hatzikiriakos, S.G., Bennington, C.P.J. "Rheology of pulp fibre suspensions: A critical review." *Chemical Engineering Science*, 2011: 3460-3470.

- Duffy, G. G. "The unique behaviour of wood pulp fibre suspensions." *9th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles*. 1997.
- Duffy, G. G., Tichener, A. L. "The disruptive shear stress of pulp networks." *Papperstidning* 78(13), 1975: 474-479.
- Ein-Mozaffari, F., Bennington, C. P. J., Dumont, G. A. "Suspension yield stress and the dynamis response of agitated pulp chests." *Chemical Engineering Science* 60, 2005: 2399-2408.
- Ein-Mozaffari, F., Bennington, C. P. J., Dumont, G. A., Buckingham, D. "Measuring flow velocity in pulp suspension mixing using ultrasonic doppler velocimetry." *Chemical Engineering Research and Design*, 2007: 591-597.
- Ein-Mozaffari, F., Upreti, S. R. "Using ultrasonic Doppler velocimetry and CFD modeling to investigate the mixing of non-Newtonian fluids possessing yield stress." *Chemical Engineering Research and Design* 87, 2009: 515-523.
- Fisher, D.T., Clayton, S.A., Boger D.V., Scales P.J. "The bucket rheometer for shear stress-shear rate measurement of industrial suspensions." *Journal of Rheology* 51(5), 2007: 821-831.
- Gullichsen, J., and E. Härkönen. "Medium concistency technology II Storage dischargers and centrifugal pumps." *Tappi Journal* 64 (6), 1981: 69-72.
- Hanjiang, X. *Measurement of fiber suspension flow and forming jet velocity profile by pulsed ultrasound doppler velocimeter, Doctoral Thesis*. Atlanta: The Institute of Paper Science and Technology Atlanta, Georgia, 2003.
- Hatzikiriakos, Savvas, G. "Wall slip of molten polymers." *Progress in Polymer Science*, 2012: 624-643.
- Head, V. P. "A shear criterion for the dynamic behaviour of paper stocks in pumps, pipes, valves and flow meters." *Tappi Journal* 35(6), 1952: 260-266.
- Huhtanen, J.-P. *Kuitususpension ja paperimassan virtauskäyttäytyminen*. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1993.
- Huhtanen, J.-P. *Modeling of Fibre Suspension Flows in Refiner and Other Papermaking Processes by Combining Non-Newtonian Fluid Dynamics and Turbulence, Doctoral dissertation*. Tampere: Tampere University of Technology, 2004.
- Huhtanen, J.-P. *Non-Newtonian Flows in Paper making*. Tampere: Tampere University of Technology, 1998.
- Jäsberg, A. *Flow behaviour of fibre suspension in straight pipes: new experimental techniques and multiphase modeling: Doctoral Thesis*. Jyväskylä: Faculty of Mathematics and Science of the University of Jyväskylä, 2007.
- Karema, H. *Particle-turbulence interaction in dilute suspensions. Lisensiaattityö*. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1993.
- Kerekes, R. J. "Rheology of fibre suspension in papermaking: An overview of recent research." *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2006: 598-612.
- Kerekes, R. J., and C.J. Schell. "Characterization of fibre flocculation by a crowding factor." *Journal of Pulp and Paper Science*, 1992: 32-38.

- Kerekes, R.J. "Pulp flocculation in decaying turbulence: a literature review." *Journal of Pulp and Paper Science* 9(3), 1983: 86-91.
- Kerekes, R.J. "The flocculation of pulp fibres." *8th Fundamental Research Symposium*. Oxford, England, 1985. 265-310.
- Lehtinen, A., Ilmoniemi, E., Wahren, D., Koskimies, J. *Puukuitujen käyttäytyminen vesiliitteessä*. Helsinki: Suomen paperi-insinöörien yhdistys, 1983.
- Lehto, J. H. "Characterization of mechanical and chemical pulp fibres." *Appita*, 2004.
- Lehto, J. H. "Mechanical fibres as reinforcement pulp." *Paper Physics Conference*. Victoria, Canada, 2003. 323.
- Lindroos, K. *Kuitujen ja turbulenssin välinen vuorovaikutus, Diplomityö*. Tampere, 1998.
- Manneville, S., Bécu, L., Colin, A. "High-frequency ultrasonic speckle velocimetry in sheared complex fluids." *European Physics Journal Applied Physics* 28, 2004: 361-373.
- Martinez, D. M. "Transactions of 12th fundamental research symposium." *Characterizing the mobility of papermaking fibre during sedimentation*. Oxford, 2001. 225-254.
- Mason, S. G. "The flocculation of pulp suspensions and the formation of paper." *Tappi Journal*, 1950: 440.
- Metso. *Sellun valmistus*. 2014.
http://www.metso.com/fi/corporation/info_fin.nsf/WebWID/WTB-060629-2256F-773AE?OpenDocument#.VBF8shCOvW8 (viitattu 9. 10. 2014).
- Mosse, W. K. J., D. V. Boger, and G. Garnier. "Avoiding slip in pulp suspension rheometry." *Society of Rheology*, 2012: 1517-1533.
- Nguyen, Q. D, and D. V. Boger. "Direct Yield Stress Measurement with the Vane Method." *Journal of Rheology* 29(3), 1985: 335-347.
- Nguyen, Q. D., and D.V. Boger. "Yield stress measurement for concentrated suspensions." *Journal of Rheology* 27(4), 1983: 321-349.
- Pasula, M. *Turbulenssin vaikutus kuituorientaatioon. Diplomityö*. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1997.
- Phan-Thien, N. *Understanding Viscoelasticity*. Berlin: Springer, 2002.
- Robertson, A. A., Mason, S.G. "The flow characteristics of dilute fibre suspensions." *Tappi* 40(50), 1957: 326-335.
- Saeed, S., Ein-Mozaffari, F., Upreti, S. "Using computational fluid dynamics modeling and ultrasonic Doppler velocimetry to study pulp suspension mixing." *Ind Eng Chem Res* 46, 2007: 2172-2179.
- Samaniuk, J. R., Shay, T. W., Klingenberg, D. J. "A Novel Rheometer Design for Yield Stress Fluids." *American Institute of Chemical Engineers AIChE J* 60, 2014: 1523-1528.
- Swerin, A. "Rheological properties of cellulosic fibre suspensions flocculated by cationic polyacrylamides." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 133(3), 1998: 279-294.

- Swerin, A., Powel, R. L., Odberg, L. "Linear and nonlinear dynamic viscoelasticity of pulp fibre suspensions." *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 7(3), 1992: 126-143.
- Takeda, Y. "Development of an ultrasound velocity profile monitor." *Nuclear Engineering and Design* 126, 1991: 277-284.
- Tanner, R. I. *Engineering Rheology, Second Edition*. New York: Oxford University Press, 2002.
- Ultimaker. *Ultimaker 2 properties*. 2014.
<https://www.ultimaker.com/products/ultimaker-2> (viitattu 20.10. 2014).
- Ventura, C., Carcia, F., Ferreira, P. "Modeling the Turbulent Flow of Pulp Suspensions." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011.
- White, Frank. M. *Viscous Fluid Flow*. Singapore: McGraw-Hill, 2006.
- Wikström, T., and A. Rasmuson. "Yield stress of pulp suspensions: The influence of fibre properties and processing conditions." *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 13(3), 1998: 243-250.

LIITE 1: VALMISTAJALTA SAADUT KOIVU- KUIDUN OMINAISUUDET



Select

ECF Bleached Hardwood Kraft Pulp

Raw Material

- Birch (Betula species) 90-100%
- Aspen (Populus tremula) 0-10%
- Softwood 0-5 %

Typical end use and applications

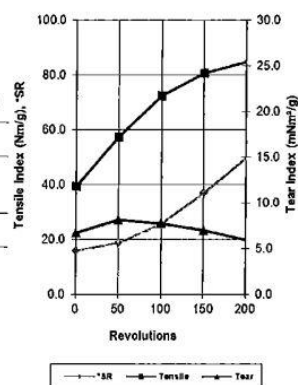
Woodfree papers, tissue, board and speciality papers

Supplying mill

Imatra

Pulp Specifications

Chemical Properties	Methods	Target	Tolerance
ISO brightness, %	ISO 2470	89	≥ 88
Dirt Count, mm ² /kg	ISO 5350-2	< 6	< 20
Viscosity, ml/g	ISO 5351	950	≥ 750
pH (cold extraction)	SCAN P14:65	5.5	≥ 4.5



Typical pulp properties

SRE Levels kWh/t	*SR	CSF ml	Tensile index Nm/g	Tear index mN m ² /g	T.stiff. index kN m/g	Air Res (Gurley s)	Scott Bond J/m ²	Bulk cm ³ /g	Opacity %
			±5%*	±3.5%*	±3.7%*				
0	16	600	39,2	6,7	6,44	3,3	196	1,48	71,1
50	19	520	57,2	8,2	7,42	6,2	382	1,37	68,0
100	26	425	72,2	7,8	7,97	24,4	796	1,28	64,6
150	37	300	80,4	7,0	8,13	155	1277	1,22	60,6
200	50	205	84,8	6,0	8,07	967		1,17	55,4
93	25	439	70**	7,8	7,87	21,8	736	1,29	65,1
59	20**	503	59,9	8,1	7,52	9,5	458	1,35	67,4
120	30**	377	75,4	7,5	8,03	74,7	982	1,26	63,1

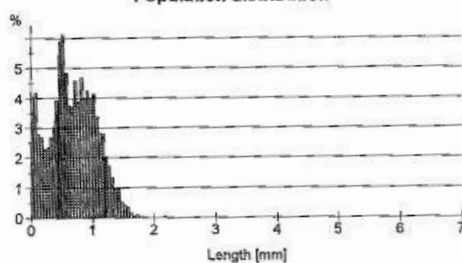
Voith Sulzer Laboratory refiner

Fillings: 3-1,0-60C, Cons (%) 4,0, SEL₄(μm) 1,0
 Typical values and average results of test samples (2013)
 All tests have been performed according to standard ISO/SCAN methods
 *) Measurement variance
 **) Interpolated

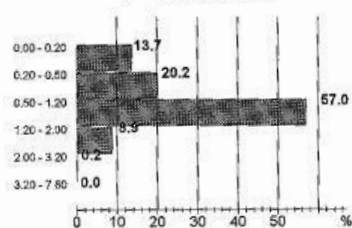
LIITE 2: MITATTUJA KOIVUKUIDUN OMINAISUUKSIA

FiberLab™		Fiber Length	TAMK/paperilaboratorio
D1			17/12/14 10:37
Sample ID - Pison	Sample name	Date	
004 - 2013	koivuseffususpensio	01-01-02 15:00	
Notes			

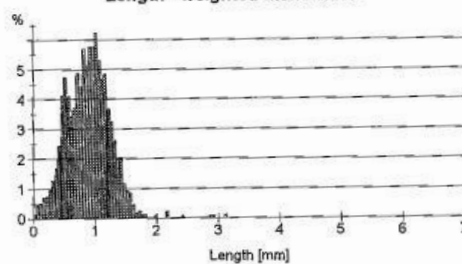
Population distribution



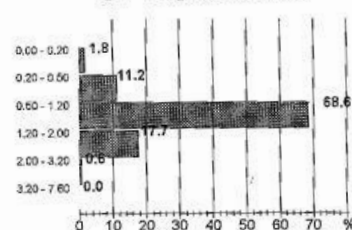
Population fractions



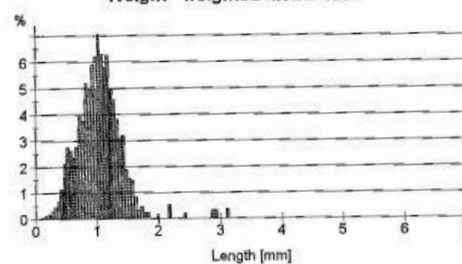
Length - weighted distribution



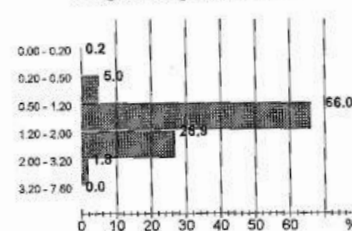
Length - weighted fractions



Weight - weighted distribution




Weight - weighted fractions

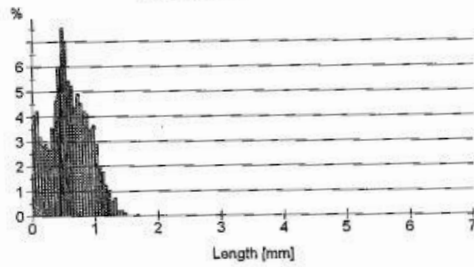


Fiber length results:

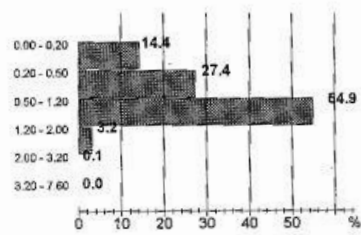
L(n)	0.68	mm
L(f)	0.90	mm
L(w)	1.05	mm
Fines(n)	13.74	%
Fines(f)	1.82	%
Fibers measured	4105	pcs
Length range	0.00 - 7.60	mm

	Projection Length D2	TAMK/paperlaboratorio 17/12/14 10:37
	Sample ID - Place 004 - 2013	Sample name kolvuselususensio
Notes		

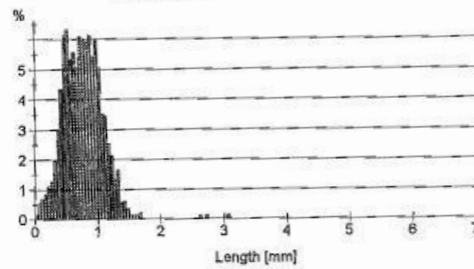
Population distribution



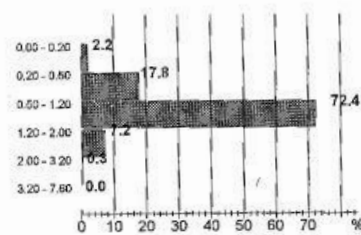
Population fractions



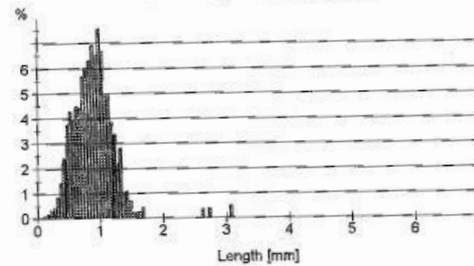
Length - weighted distribution



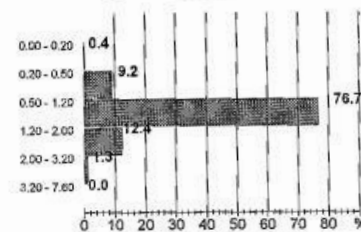
Length - weighted fractions



Weight - weighted distribution



Weight - weighted fractions

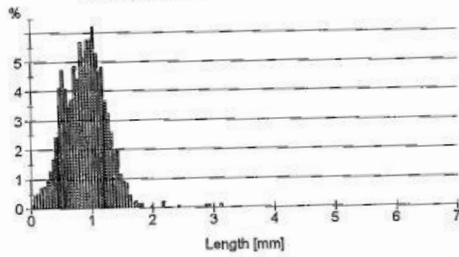


Projection length results:

L(n)	0.59	mm
L(l)	0.77	mm
L(w)	0.90	mm
Fines(n)	14.37	%
Fines(l)	2.24	%
Fibers measured	4105	pcs
Length range	0.00 - 7.60	mm

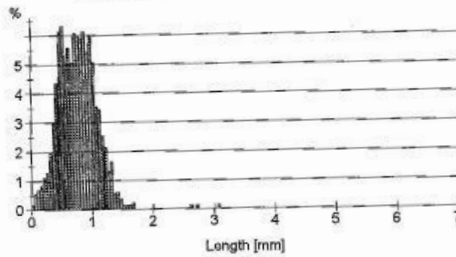
FiberLabTM		Summary Report		TAMK/paperlaboratorio	
D3				17/12/14 10:37	
Sample ID - Place	Sample name	Date			
004 - 2013	kolivusellususpensio	01-01-02 15:00			
Notes					

Fiber length - weighted distribution



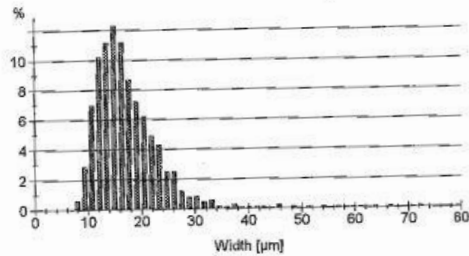
Length results:	Cont	Proj	
L(n)	0.68	0.59	mm
L(l)	0.90	0.77	mm
L(w)	1.05	0.90	mm
Fines(n)	13.74	14.37	%
Fines(l)	1.82	2.24	%
Fibers measured		4105	pcs
Length range		0.00 - 7.60	mm
Coarseness	0.000		mg/m
Fibers/mg	0.00		pcs/mg
Weight	0.000		mg
Fibers total	8412		pcs

Proj. length - weighted distribution



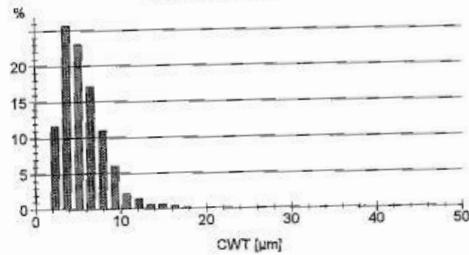
Wood species:	<none>	
		Cont
Reference 1:		0.0 %
Reference 2:		0.0 %
Reference 3:		0.0 %
Custom results:		
Y1:	0.00	<none>
Y2:	0.00	<none>
Y3:	0.00	<none>

Fiber width distribution



Length weighted fractions:	Fr (l)	Fr p(l)	
mm			
0.00 - 0.20	1.82	2.24	%
0.20 - 0.50	11.22	17.78	%
0.50 - 1.20	68.60	72.40	%
1.20 - 2.00	17.73	7.23	%
2.00 - 3.20	0.64	0.35	%
3.20 - 7.60	0.00	0.00	%

Fiber CWT distribution



Fiber width:	17.0	µm
Fiber CWT:	4.0	µm
Fibers Imaged:	3366	pcs
Width range:	1.4 - 140.0	µm
CWT range:	1.4 - 140.0	µm

