

Terhi Ropponen

MODIFIOIDUN SELLULOOSAN FRAKTIOINTI PAINELAJITTIMELLA

Opinnäytetyö

Biotuotetekniikka

2021



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Terhi Ropponen
Työn nimi	Modifioidun selluloosan fraktiointi painelajittimella
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu/ Kuitulaboratorio, UPM
Vuosi	2021
Sivut	58 sivua, liitteitä 4 sivua
Työn ohjaaja(t)	Antti Heikkinen ja Jarkko Männynsalo (Xamk) Pasi Virtanen (UPM)

TIIVISTELMÄ

Selluloosan lajittelu on paljon tutkittu sellutuotannon osa-alue. Sellun jatkokäytön painopisteiden muuttuessa on entistä suurempi tarve tietynlaisten, kaapeampien kuitukokojakaumien selluille ja niiden tehokkaille tuotantomenetelmille. Työn tavoitteena oli selvittää, onnistuuko modifioidun selluloosan fraktiointiprosessi tuotantomittakaavassa. Fraktiointi perustuu suurelta osin todennäköisyyteen, josta johtuen täydellinen erottelutulos ei ole nyky menetelmillä saavutettavissa. Tutkimuksessa keskityttiin erityisesti karkean jakeen eli pitkien kuitujen sekä mahdollisten kuitukimppujen poistoon. Lajittelussa pyrittiin laadullisesti ja määrällisesti optimaaliseen saantoon ja mahdollisimman vähäiseen kuitujen pilkkoutumiseen.

Fraktiointikokeet tehtiin teollisen mittakaavan painelajittimella käyttäen yleisesti saatavilla olevia sihtikoreja ja roottoria. Modifioidun massan saatavuudesta johtuen esikoe tehtiin eri massalla kuin varsinainen koeajo, ja molemmissa koeajoissa lajittimen ulostulovirrat ohjattiin takaisin syöttösäiliöön. Koeajoissa testattiin massaan, lajittimen kokoonpanoon sekä lajittimen operointiin liittyvien muuttujien vaikutusta fraktiointitulokseen. Syöttö-, aksepti- ja rejektivirroista otettiin näytteitä, joista tehtiin laboratorioanalyyseja. Analyysimenetelmistä tärkeimpiä olivat kuituanalyysi ja kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen. Syöttönäytteiden tuloksia verrattiin keskenään, jotta nähtiin massan kierrätyksestä mahdollisesti aiheutuneet muutokset ja muiden tulosten vertailukelpoisuus. Aksepti- ja rejektinäytteiden tuloksia verrattiin erilaisten lajittelun tehokkuutta kuvaavien yhtälöiden avulla sekä visualisoimalla saatuja vertailutuloksia taukkolaskentaohjelmalla.

Varsinaisessa koeajossa päästiin pitkien kuitujen erottelun osalta hyviin tuloksiin. Pienempien kuitujen erottelutehokkuus oli kuitenkin alhainen, mikä tarkoittaa, että akseptikelpoista kuitua ajautui rejektivirtaan. Näin ollen rejektin sakeutumista ei saatu optimaaliselle tasolle, minkä arveltiin johtuvan massan koostumuksesta ja roottorin kehänopeuden vaikutuksesta. Fraktiointikapasiteetti oli lähes kääntäen verrannollinen fraktioinnin erottelutehokkuuteen, eli parhaiten erotelleet koepisteet olivat lähes tai tosiasiallisesti kapasiteetiltaan huonoimmat. Modifioitua selluloosaa voidaan lajitella painelajittimella, kun käytetään kyseiselle massatyypille soveltuvia prosessimuuttujia, kuten sopivaa sakeutta, oikeaa lajittimen kokoonpanoa ja optimaalisia operaatioparametreja. Fraktioinnin jatkokehittelyssä huomio olisi kiinnitettävä erityisesti sihtikorin aukkojen kokoon ja muotoiluun sekä roottorin kehänopeuteen, kapasiteettia unohtamatta.

Asiasanat: fraktiointi, painelajitin, kemiallinen massa, optimointi

Degree	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Terhi Ropponen
Thesis title	Pressure screen fractionation of modified pulp
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences/ UPM
Time	July 2021
Pages	58 pages, 4 pages of appendices
Supervisors	Jarkko Männynsalu & Antti Heikkinen (Xamk) Pasi Virtanen (UPM)

ABSTRACT

Screening is a widely researched area of pulp production. The changes of balance in the pulp processing industry create a growing need for specific pulps with narrower fibre size distribution, alongside with efficient production methods. The objective of the thesis was to research if a production scale fractionation of modified cellulose could be performed. A perfect separation cannot be achieved with current methods because fractionation is mainly based on probability. The research concentrated especially on coarse fraction separation, i.e., separating long fibres and shives from premium pulp. Premium fibre loss caused by the nature of screening was attempted to minimize, as was the degradation of fragile fibres caused by mechanical stress.

Fractionation experiments were performed with an industrial scale pressure screen using commonly available screen baskets and rotor. Tentative experiment was performed using different pulp than in the main experiment, due to the availability of modified pulp. Exit streams of the pressure screen were led back to the feed tank. Effects of furnish parameters, screen parameters and operating parameters to fractionation results were experimented. Samples of feed, accept and reject streams were taken and analysed in a laboratory. The most important analysing methods were fibre- and dry solids content analyses. The feed samples were compared to discover the possible changes caused by pulp recovery and to evaluate the comparability of other samples. Results of the accept and reject samples were compared using various equations and visualization of the results with a spreadsheet program.

Good results concerning long fibre separation were achieved in the main experiment. However, the separation efficiency with smaller fibres was low, meaning the leaking of premium fibres to reject fraction. Thus, the reject thickening factor was not optimized, which was presumed a result of the pulp composition and the rotor tip velocity. The fractionation capacity was inversely proportional to separation efficiency, meaning that the best fractionation performance came with poor capacity. Modified pulp can be fractionated with a pressure screen when applying appropriate process parameters, e.g., right consistency and optimal screen and operating parameters. Further development of fractionation should consider different screen basket designs and rotor tip velocity, not forgetting capacity.

Keywords: fractionation, pressure screen, chemical pulp, optimization

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	SELLULOOSA MATERIAALINA JA RAAKA-AINEENA	8
2.1	Selluloosan alkuperä	8
2.2	Puun kuitumatriisi	8
2.2.1	Puukuitujen morfologiaa	8
2.2.2	Puusolujen kemiallinen koostumus	10
2.3	Selluloosateollisuus	10
2.4	Kraft-selluloosa	11
2.5	Sellun käyttö	12
3	FRAKTIOINTI	12
3.1	Miksi fraktiointia tehdään	12
3.2	Fraktioinnin tavoitteet	13
3.3	Fraktioinnin menetelmät	13
3.4	Perustelut valittuun menetelmään	14
4	PAINELAJITIN	14
4.1	Painelajittelun käyttö prosesseissa	14
4.2	Painelajittelun teoriaa	15
4.3	Painelajittimen toimintaperiaate	16
4.4	Painelajitteluun vaikuttavat tekijät	17
4.4.1	Massan ominaisuudet	18
4.4.2	Lajittimen ominaisuudet	19
4.4.3	Operaatioparametrit	24
5	KOKEELLINEN OSUUS	25
5.1	Käytetyt laitteet	26
5.2	Esikoe	26
5.2.1	Koejärjestelyt	26
5.2.2	Esikokeen koesuunnitelma ja kulku	27

5.3	Varsinainen koeajo	29
5.3.1	Koesuunnitelma	29
5.3.2	Koeajon kulku	31
5.4	Mittaustavat	31
5.4.1	Prosessilaitteiston hallinta ja mittaustiedot.....	32
5.4.2	Massan ominaisuuksien määrittäminen	33
5.4.3	Fraktiointitulosten analysointi.....	34
6	TULOKSET	36
6.1	Esikokeen tulokset.....	36
6.2	Esikokeen massa-analyysitulokset	38
6.3	Varsinaisen lajittelukokeen tulokset	40
6.4	Lajittelukokeen massa-analyysitulokset.....	42
6.4.1	Tuloksista johdetut vertailuluvut.....	43
6.5	Mikroskopia	44
7	TULOSTEN ANALYSOINTI	45
7.1	Parametrien vaikutus varsinaisen koeajon tuloksissa	45
7.2	Tulosten luotettavuus.....	48
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	49

KUVALUETTELO

TAULUKKOLUETTELO

LIITTEET

Liite 1. Taulukko 25, vaiheen 1 kuituanalyysitulokset.

Liite 2. Taulukko 26, vaiheen 2 kuituanalyysitulokset.

Liite 3. Taulukko 27, vaiheen 3 kuituanalyysitulokset.

Liite 4. Taulukko 28, vaiheen 4 kuituanalyysitulokset.

Kaavoissa käytetyt lyhenteet

A_s	sihdin avoin pinta-ala	[m ²]
C	tietyn komponentin pitoisuus	[%]
C_F	syötön kuiva-ainepitoisuus	[%]
C_R	rejektin kuiva-ainepitoisuus	[%]
D	roottorin halkaisija	[m]
I, II	viittaavat aksepti- ja rejektijakeisiin	
n	roottorin kierrosluku	[rpm]
P_P	massan läpäisyindeksi	[-]
Q_K	Karnisin Q-indeksi	[-]
Q_N	Nelsonin Q-indeksi	[-]
RR_m	massarejektisuhde	[%]
RR_V	tilavuusrejektisuhde	[%]
RTF	rejektin sakeutumiskerroin	[-]
\dot{V}_A	akseptin tilavuusvirtaus	[m ³ /s]
\dot{V}_F	syötön tilavuusvirtaus	[l/s]
V_k	kehänopeus	[m/s]
V_r	rakonopeus	[m/s]
\dot{V}_R	rejektin tilavuusvirtaus	[l/s]
X	valittu laatukriteeri, esim. fraktio	
π	piin arvo	[-]

Muita työssä käytettyjä lyhenteitä

A, R, S	aksepti, rejekti, syöttö
Q	fraktiointi-indeksi, Q-indeksi

1 JOHDANTO

Kuitujen lajittelu on yleinen ja paljon tutkittu selluloosa- ja paperituotannon osa-alue. Lajittelun päätarkoitus on varmistaa tuotetun massan laatu ja sen toimivuus jatkojalostuksessa. Yksikin tikku tai kuitukimppu esimerkiksi paperikoneella voi aiheuttaa paperirataan katkoksen. Laadun varmistuksessa on kuitenkin ajateltava myös kokonaiskustannuksia ja onkin pyrittävä tuotannon kannalta riittävän hyvään tulokseen kohtalaisilla kuluilla. Sopivasti kohdennettu ja mitoitettu lajittelu auttaa minimoimaan energian ja kemikaalien kulutusta prosesseissa. Aiheesta ei kuitenkaan ole ollut saatavilla koko ajan yleistyvien, erilaisten modifioitujen selluloosamateriaalien fraktiointiin kohdennettua tutkimustietoa.

Työn tarkoituksena oli tutkia, voiko selluloosan jalostusprosessissa jo modifioitua selluloosaa fraktioida teollisuusmittakaavassa niin, että lajittelun ohessa syntyvät ei-toivotut kuitumuutokset jäisivät siedettävälle tasolle. Onnistuneen fraktioinnin avulla modifiointiprosessia ja jatkojalostusta voitaisiin keventää, jolloin säästyisi resursseja ja samalla tuotteen laatu paranisi. Modifioidun selluloosan kuiturakenne on kuitenkin suhteellisen hauras, minkä vuoksi lajittelun olisi oltava riittävän hellävaraista. Fraktioinnissa keskityttiin karkean jakeen tehokkaaseen poistoon, mutta tavoitteena oli myös mahdollisimman vähäinen priimakuituhäviö. Hienojakeen poistaminen erillisellä menetelmällä rajattiin käytettävissä olleen ajan perusteella pois työstä suunnitteluvaiheessa.

Työn kokeellinen osuus suoritettiin loppukevään ja alkukesän 2021 aikana Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kuitulaboratoriolla. Alustavia fraktiointikokeita tehtiin esikokeessa, jonka tulosten avulla varsinaisen lajittelukokeen koesuunnitelmassa voitiin keskittyä fraktiointituloksen kannalta oleellisiin muuttujiin. Muuttujia olivat esimerkiksi lajittimen sihtikorin rakoleveys ja massan kuitukoostumus sekä lajittimen ajoparametrit.

Kirjallinen osuus käsittää perustiedot selluloosasta, sen käyttökohteista ja lajittelun teoriasta; lisäksi painelajittelusta kerrotaan yksityiskohtaisemmin. Laajempi tulosdata on sijoitettu liitteisiin, mutta tärkeimmät tulokset käydään läpi tuloskappaleessa ja erillisessä analyysissä.

2 SELLULOOSA MATERIAALINA JA RAAKA-AINEENA

Luvussa kerrotaan perustietoa selluloosasta, sen käyttökohteista ja siitä miksi selluloosaa pyritään hyödyntämään yhä uusissa sovelluksissa. Joitakin työn osia koskee tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoimintaan liittyvä salassapitovelvollisuus, joten fraktioiden kohteena olevaa selluloosamassaa ei kuvata yksityiskohtaisesti. Sen sijaan materiaalia kuvataan yleistasolla ja sen ominaisuuksista kerrotaan ainoastaan työn tulokannan kannalta oleelliset seikat.

2.1 Selluloosan alkuperä

Selluloosa on runsaimmin luonnossa esiintyvä biopolymeeri. Selluloosa muodostaa yhdessä hemiselluloosan, pektiinin sekä ligniinin kanssa kennomaisia rakenteita, joista kasvikuidut koostuvat. Selluloosatuotteiden ja paperisellun tärkeimmät lähteet ovat puu ja puuvilla, ja vain noin 7 % ensikuitusellun tuotannosta tulee muista kuin puulähteistä. FAOSTAT-tietokannan mukaan (FAO 2021) Suomessa selluloosan teollisen tuotannon lähteinä käytetään pelkästään havu- ja lehtipuuta (taulukko 1), joten tässä työssä tarkastellaan puusellun koostumusta. (Willför ym. 2011, 16.)

Taulukko 1. Suomen sellutuotanto 2019 (FAO 2021).

Laatu	mekaaninen ja kemimekaaninen sellu	kemiallinen massa	liukosellu	sellu muista kuin puulähteistä
Määrä (t)	3280000	8320000	400000	0

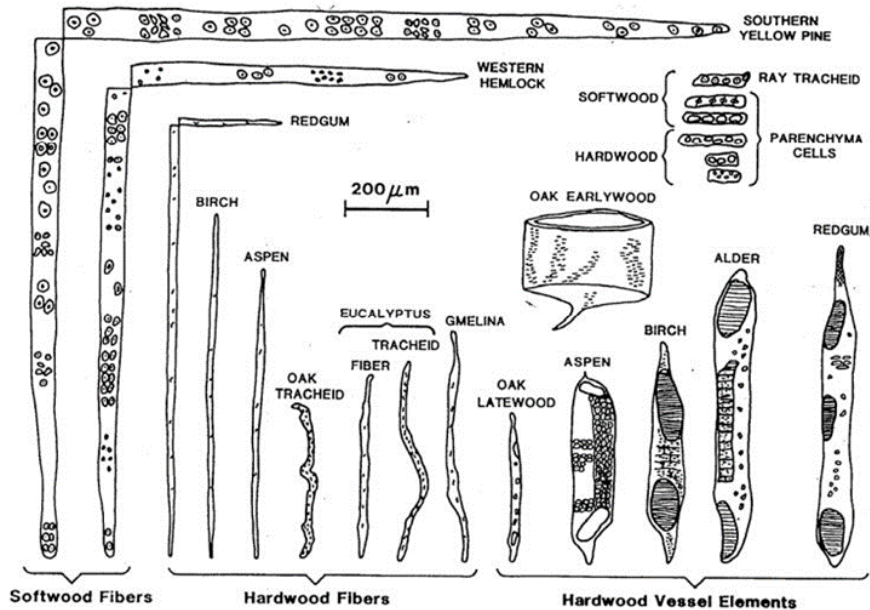
2.2 Puun kuitumatriisi

Puu on koostumukseltaan vaihteleva materiaali. Vaihtelu johtuu puulajien erityyppisistä soluista, solujen eri tehtävistä puumatriisissa ja jopa puuyksilöiden kasvussa tapahtuvista eroavaisuuksista (Alén 2000; Knowpap 2021a; Vander Wielen 2004, 38).

2.2.1 Puukuitujen morfologiaa

Selluloosan kannalta puulajit voidaan karkeasti jakaa kahteen luokkaan; havu- ja lehtipuihin. Havupuiden solut ovat pääasiassa (n. 90 %) kuitumaisia putki-

soluja ja loput lyhyitä, säteittäisiä putkisoluja ja tylppysoluja. Lehtipuiden soluista noin 55 % on kuituja, kolmannes tiehtysoluja ja alle viidennes tylppysoluja. Puusolujen muoto- ja pituuserot, solurakenteista johtuvat erot kuitujen kemiallisessa koostumuksessa sekä erilaiset valmistusmenetelmät johtavat siihen, että sellukuidun ominaisuuksissa on suurta vaihtelua (Alén 2000; Vander Wielen 2004, 23–49.)



Kuva 1. Erilaisia puusoluja mittakaavassa (Sundqvist 2007, 14).

Taulukossa 2 eritellään joitakin yleisimpiä puusoluja ja niiden ominaisuuksia.

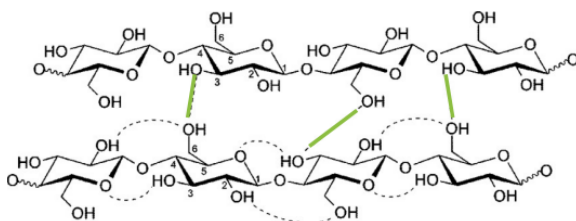
Taulukko 2. Yleisimpien puusolujen ominaisuuksia (Alén 2000, 18).

Luokka	Solutyyppi	Tehtävä	Osuus puusta, til. %	Pituus, mm	Leveys, μm
Havupuu	Putkisolu (trakeidi)	Tuki, johtuminen	90	1,4–6,0	20–50
	Sädeputkisolu	Johtuminen	< 5	0,01–0,16	2–50
	Säteittäistylppysolu	Varastoiminen	< 10		
	Epiteelitylppysolu	Pihkan erityis	< 1		
Lehtipuu	Kuitu	Tuki	55	0,4–1,6	10–40
	Tiehyt	Johtuminen	30	0,2–0,6	10–300
	Pitkittäistylppysolu	Varastoiminen	< 5	< 0,1	< 30
	Säteittäistylppysolu	Varastoiminen	15		

2.2.2 Puusolujen kemiallinen koostumus

Puun solut koostuvat pääasiassa erilaisista polymeereistä, joita ovat selluloosa (40 %–50 %), hemiselluloosat (15 %–25 %) ja ligniini (15 %–30 %). Puussa on myös pienempinä pitoisuuksina uuteaineita, pektiiniä ja epäorgaanisia yhdisteitä. (Bajpai 2018, 215; Fahlén 2005, 4; Vander Wielen 2004, 30.)

Selluloosa on pitkäketjuinen, glukoosista koostuva polymeeri. Selluloosapolymerien hydroksyyliiryhmät muodostavat vahvoja vetysidoksia selluloosamolekyylin sisällä sekä molekyylien välille. Molekyyleistä muodostuu säiemäisiä molekyylikimppuja eli fibrillejä. Kaikkien puusolujen kuitumaisuus johtuu selluloosasäikeiden muodostamasta, lineaarisesti järjestäytyneestä kiderakenteesta, johon amorfiset alueet tuovat joustavuutta. Hemiselluloosapolymeerit ovat haarautuneita, lyhyempiä ja amorfisia, ja koostuvat muun muassa mannoosista, ksyloosista tai arabinoosista. Hemiselluloosien rakenne ja selluloosaa alhaisempi polymerisaatioaste tekee niistä alttiimpia kemikaaleille. Hemiselluloosakoostumus vaihtelee puulajeittain ja etenkin lehti- ja havupuiden välillä. Ligniini on kolmiulotteinen, erilaisista fenyylipropaaniyksiköistä koostuva amorfinen polymeeri, jonka koostumus myöskin eroaa lehti- ja havupuiden välillä. Ligniini ja hemiselluloosat sitovat selluloosasäikeet toisiinsa muodostaen puukuituja. (Bajpai 2018, 235; Vuori 2016, 2–3; Vander Wielen 2004, 30–41).



Kuva 2. Selluloosapolymerien hydroksyyliiryhmät muodostavat vahvoja vetysidoksia ketjun sisällä ja molekyyliketjujen välille (Siljander & Björkqvist 2019, 9).

2.3 Selluloosateollisuus

Jotta puuraaka-aineesta saadaan erotettua jatkojalostukseen soveltuva selluloosakuitu, täytyy puun rakenne hajottaa ja sitten erottaa kuidut ja muut ainesosat toisistaan (Vander Wielen 2004, 23). Sellunvalmistuksen tuotantotavat voidaan jakaa mekaanisiin, kemimekaanisiin, puolikemiallisiin sekä kemiallisiin prosesseihin. Kemiallisten menetelmien sellunsaanto on pienempi kuin

mekaanisilla menetelmillä, mutta saadut kuidut ovat kokonaisia. Kemiallisista prosesseista niin sanottu kraft-prosessi on kaikkein yleisin noin 90 % osuudellaan. Mekaanisilla menetelmillä valmistettu kuitumassa sisältää ligniiniä, joka taas kemiallisissa valmistusmenetelmissä pyritään mahdollisimman tarkkaan poistamaan. (Bajpai 2018, 295; Forestbiofacts 2021a & 2021b; Hu ym. 2013, 139.)

2.4 Kraft-selluloosa

Kraft-selluloosan valmistusprosessissa noin puolet syötetystä raaka-aineesta hajoaa ja liukenee natriumhydroksidia ja natriumsulfidia sisältävään keittoliuokseen. Rakenteestaan johtuen etenkin hemiselluloosat pilkkoutuvat ja liukenevat helposti kemiallisessa prosessissa, mutta voivat kiinnittyä uudelleen kuituihin kraft-keiton loppupuolella (Vander Wielen 2004, 41). Ligniininpoistoksin kutsutussa prosessissa myös suurin osa (n. 90 %) kuituja yhteen sitovasta ligniinistä liukenee keittokemikaaleihin. Keittokemikaaleista ja liuenneista aineista syntyvää liuosta kutsutaan mustalipeäksi. Keiton jälkeen sellu ja mustalipeä erotetaan toisistaan monivaiheisessa pesuprosessissa, jonka jälkeen sellumassa voidaan valkaista. Valkaistu massa sisältää pääasiassa hiilihydraatteja eli selluloosaa ja hemiselluloosaa, lisäksi hieman ligniiniä, uuteaineita ja epäorgaanisia aineita. Kuvassa 1 on mikroskooppisuurennos käsitellystä sellusta, jossa on erikokoisia kuituja ja muita partikkeleita. (Forestbiofacts 2021 c; Vander Wielen 2004, 46.)



Kuva 3. Mikroskooppikuvassa on havaittavissa käsitellyn sellun sisältämiä erikokoisia kuituja ja hienoainesta.

2.5 Sellun käyttö

Sellumassasta jalostettu painopaperi ja kartonki ovat pitkään olleet eräitä Suomen merkittävimpiä vientituotteita (Tulli 2021). Painopaperin käytön edelleen vähentyessä, sen merkitys sellutuotannon ja talouden kannalta muuttuu. Paperikoneita suljetaan tai konvertoidaan muiden tuotteiden valmistamiseen. Sellun merkitys vientituotteena kasvaa, ja sellutuotannolle haetaan lisäarvoa uusista käyttösovelluksista (Biotalous 2014; Järvinen 2021; Trivedi 2019; Suomen Metsäyhdistys 2021). Korkeamman jalostusasteen tuotteilla voitaisiin korvata paperituotannon vähenemisestä johtuvaa tulojen menetyksiä. Etenkin selluloosasta valmistettavien tekstiilikuitujen odotetaan haastavan perinteisiä materiaaleja vaatteissa ja kodintekstiileissä (Metsäteollisuus 2019). Selluloosan käyttö fossiilisten raaka-aineiden ohessa ja korvaajana on jatkuvan kehityksen kohteena (Labafzadeh 2015; Shojaeiarani ym. 2019). Metsäteollisuuden tutkimus- ja kehittämismenot ovat kuitenkin pysyneet maltillisella tasolla verrattuna koko tehdasteollisuuteen. (Viitanen & Kniivilä 2020; Viitanen ym. 2020, 4 ja 35–46.)

3 FRAKTIOINTI

Selluloosan lajittelussa pyritään poistamaan ei-toivotut jakeet menettämättä liikaa varsinaisesta tuotteesta rejektin mukana. Kun tavoitteena on tietyn kuidunpituusjakauman omaava tuote, lajittelua kutsutaan fraktioinniksi (Forestbiofacts 2021d). Tässä työssä keskityttiin suuremman partikkelikoon omaavan jakeen poistoon, johon todettiin painesihdin olevan toimivin lajitintyyppi.

3.1 Miksi fraktiointia tehdään

Selluloosan jatkojalostuksessa massan tasalaatuisuus on tärkeää, jotta tuotteen laatu pysyy halutulla tasolla. Kuitumassan erikokoiset partikkelijakeet käyttäytyvät prosesseissa eri tavoin, jolloin tiettyjen tuotteiden tasaisen laadun varmistamiseksi partikkelien kokojakaumaa on rajattava. Selluloosamassasulppu voi sisältää ei-toivottuja karkeita partikkeleita, kuten puun uuteaineista koostuvia tahmoja ja jauhautumattomia kuitukimppuja tai hiekkaa, sekä pidemmälle pilkkoutunutta hienoainesta. Paperikoneella tai muussa jatkojalostuksessa karkeat partikkelit aiheuttavat tuotteeseen epäjatkuvuuskohtia ja li-

kaavat tai tukkivat laitteita. Liikaa jauhautunut hienoaines taas lisää kemikaalien tarvetta ja vaikeuttaa veden poistoa massan, paperirainan tai muun tuotteen kuivauksessa. (Bajpai 2018, 236–239, 420; Hautala ym. 1999, 251–252; Knowpap 2021b; Larsson ym. 2019; Madani ym. 2011.)

Polymeeristen selluloosajohdannaisten, kuten esimerkiksi viskoosin, selluloosaesterien ja -etterien valmistuksessa käytetään erittäin puhdasta kemiallista sellua, liukosellua. Toisin kuin paperinvalmistuksessa, liukosellussa on tavoitteena mahdollisimman alhainen hemiselluloosapitoisuus. Korkean jalostusarvon omaavat räätälöidyt kuidut ovat tuotekehittelyn kiinnostuksen kohteena (Bajpai 2018, 422). Selluloosajohdannaisten valmistuksessa ja tuotekehityksessä haasteita tuottavat muun muassa lähtöaineen heterogeenisyys, kokeellisten olosuhteiden uusittavuus, puhdistusvaikeudet ja tuotteen laadun vakioiminen. Edellä mainituista ainakin lähtöaineen heterogeenisyyteen voitaisiin vaikuttaa tehokkaalla fraktioinnilla. (Bajpai 2018, 236–239, 420; Hautala ym. 1999, 251–252; Knowpap 2021b; Larsson ym. 2019; Madani ym. 2011.)

3.2 Fraktioinnin tavoitteet

Kuitukimput ja ylipitkät kuidut pyritään poistamaan, jotta massasta saadaan tasalaatuisempaa. Liian hieno jae on myös poistettava erikseen tai sidottava kemikaalien avulla suuremmiksi partikkeleiksi. Rajaamalla sellumassan partikkelikokojakaumaa, massan jatkojalostusta voidaan säätää tarkemmin. Tällöin valmistuksessa tarvittavien kemikaalien ja käsittelyiden tarve vähenee, ja tuotteen laatu paranee. Fraktioinnissa rejektiin joutunut jae voidaan käsitellä erikseen ja palauttaa takaisin akseptin joukkoon, jolloin raaka-aine hyödynnetään kokonaan. Rejektoitu karkea jae voidaan myös hyödyntää esimerkiksi saman tuotteen eri kerroksissa. (Asikainen 2015; Bajpai 2018, 420; El-Sharkawy ym. 2008; Jokinen 2007, 61; Hautala ym. 1999, 251; Knowpap 2021b;)

3.3 Fraktioinnin menetelmät

Yleisimmät fraktioinnissa käytetyt laitetypit ovat erilaiset konesihdit ja pyörrepuhdistimet. Fraktioinnin suhteen niiden toiminnot ovat kuitenkin hieman erilaiset. Konesihdit lajittelevat pääasiassa kuidun pituuden ja notkeuden perus-

teella, kun taas pyörrepuhdistimissa lajitteluun vaikuttavat soluseinän pakkaus, karkeus ja fibrillaatio. (Asikainen 2015, 27; Bergström 2006, 10–12; Krotscheck 2006, 561).

3.4 Perustelut valittuun menetelmään

Pyörrepuhdistimella lajittelu tapahtuu partikkelien ominaispinta-alan ja tiheyden suhteen ja pyörrepuhdistimet ovatkin parhaimmillaan esimerkiksi hiekan erotuksessa sellusta (Bergström 2006, 2–12; Hautala ym. 1999, 282; Seppälä ym. 2005, 120). Pyörrepuhdistimessa massan sakeuden tulisi olla jopa alle 0,5 %, ja kuitujen pituusjakaumaan perustuvaa fraktiointia ei juurikaan tapahdus (Potgier ym. 2021, 77). Painelajittimessa lajittelu taas perustuu lähinnä partikkelien notkeuteen ja kokoon, etenkin pituuteen (Asikainen 2015, 27; Bergström 2006, 10). Painelajittimen toimintaa on myös mahdollista säätää monella eri tavalla, riippuen lajiteltavan massan koostumuksesta (Olson 2001). Painelajittimia käytetään paitsi lajitteluun, myös selluloosan fraktioinnissa (Ämmälä 2001, 16). Työssä lajiteltu massa oli modifioitu siten, että selluloosakuitujen koostumus oli jo suhteellisen tasalaatuista, eikä hiekkakaan oletettu olevan. Lajittelu tulisi myös tehdä mahdollisimman korkeassa sakeudessa, jotta prosessi olisi kustannustehokas (Asikainen 2015, 28; Tervola ym. 2011, 444). Edellä mainitut seikat huomioiden, painelajittelu todettiin sopivimmaksi menetelmäksi tähän työhön. (Jokinen 2007.)

4 PAINELAJITIN

Painelajitin on umpinaisen sylinterin muotoinen laite, joka liittyy suljettuun prosessiin (Tervola ym. 2011, 437–438). Syöttö tapahtuu syöttöputken sijainnista ja tulokulmasta riippuen tangentiaalisesti tai aksiaalisesti. Painelajittimia edeltävät lajittelumenetelmät toimivat normaali-ilmanpaineessa. Nykyaikaisten painesihtien suosio perustuu profiloitujen sihtien keksimiseen. (Bajpai 2018, 408; Hautala ym. 1999, 268; Jokinen 2007, 29; Ämmälä 2001, 16–17.)

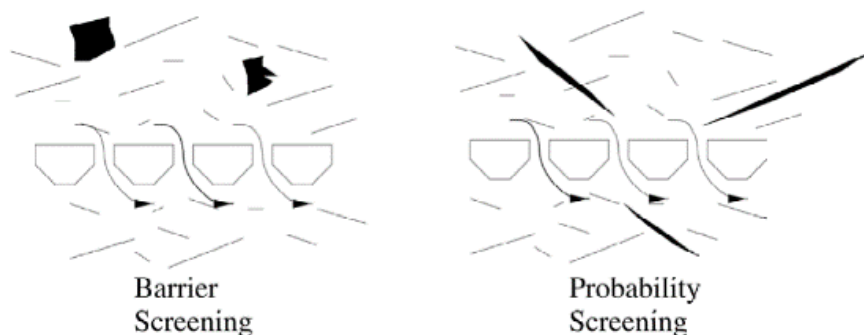
4.1 Painelajittelun käyttö prosesseissa

Lajittelu on erittäin tärkeä osa sellun ja paperin tuotantoa, ja painelajittimia käytetään laajalti prosesseissa. Erilaisia lajittimia sijaitsee kemiallisissa sellu- prosesseissa keiton jälkeen ennen pesua (oksanpoisto), pesun jälkeen ennen

happivalkaisua tai happivalkaisun ja kemiallisen valkaisun välissä (Seppälä ym. 2005, 110, 138). Bergin & Lingqvistin (2017) ja Hautalan ym. (1999, 256) mukaan fraktioinnin merkitys kasvaa entisestään, kun paperikoneiden tuotanto- ja laatuvaatimukset kasvavat sekä selluloosan uudet aplikaatiot valtaavat alaa. (Knowpap 2021b; Forestbiofacts 2021e.)

4.2 Painelajittelun teoriaa

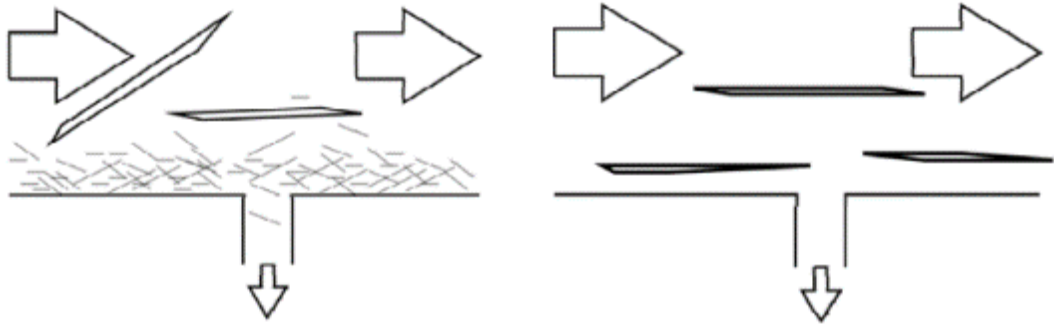
Täydellinen erottelu ei ole lajittelussa mahdollista, sillä rejektiin jää varmulla ainoastaan sihtirummun aukkoja isommista partikkeleista koostuva jae, ja myös osa aukkoja pienemmistä partikkeleista joutuu rejektiin. Lajittimen sisällä tapahtuva massan jakautuminen kahteen eri kuitujakauman omaavaan jakeeseen tapahtuu pääasiassa kahdella eri tavalla: esteeseen tai todennäköisyyteen perustuen (Kuva 4). Esteeseen perustuvaa eli barrier-teorian mukaista lajittumista tapahtuu, kun kuitujen kaikki dimensiot ovat suurempia kuin sihtikorin aukot. Tältä osin lajittelun tehokkuus on 100 %, koska suuremmat partikkelit eivät pysty läpäisemään sihtirumpua. Toinen päämekanismi perustuu todennäköisyyteen. (Bajpai 2018, 422–423; Olson 2003, 6–8; Tervola ym. 2011, 432.)



Kuva 4. Este- ja todennäköisyyslajittuminen (Olson 2003, 7).

Todennäköisyyteen perustuva lajittuminen voidaan jakaa useaan eri mekanismiin, esimerkiksi huopautumiseen ja orientaatioon perustuviin (Kuva 5). Huopautumisteorian mukaan merkittäviä tekijöitä lajittumisessa ovat paitsi sihtirummun aukkojen ja poistettavien partikkelien välinen kokoero, myös paineero sihdin yli. Paine-erosta johtuen kuidut muodostavat sihdin pinnalle kerroksen, jonka läpi suotautuessaan akseptista lajittuu enemmän partikkeleita, kuin pelkän sihtirummun läpi virratessa. Orientaatioteoria perustuu lajittimen sisällä massavirtausten ja roottorin muotoilusta johtuvan pulsaation aiheuttamiin

paine-eroihin, jolloin kuidut orientoituvat sihtirummun pinnalla kulkevan radiaalisen virtauksen suuntaisesti. Virtaus ja kuitujen suuntautuminen kuljettaa osan painavista tai jäykistä kuiduista sihtirummun aukkojen ohi. (Hautala ym. 1999, 256; Olson 2003, 6–8; Tervola ym. 2017, 432.)



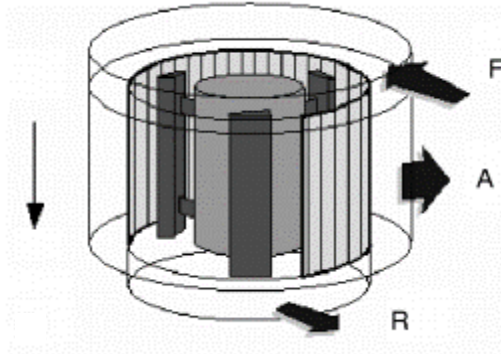
Kuva 5. Huopautuminen ja orientaatio (Olson 2003, 7).

Kuitujen fraktiointi perustuu todennäköisyyteen. Se johtuu siitä, että kuidut ovat pitkänomaisia ja voivat siten läpäistä sihtirummun jossakin asennossa, jos yksikin niiden ulottuvuus on pienempi kuin sihdin aukot (Karjalainen 2015, 29). Prosessin rejektisuhde on korkea, ja lajittelu on kuiduille hellävarainen. Yleensä paras erottelutulos saavutetaan sileäpintaisilla reikäsihdeillä, sileämällä roottorimallilla ja matalassa sakeudessa, jolloin kuidut eivät painu sihdin reikien läpi. Kuitenkin profiloituneet sihtimallit ovat yleisesti käytössä, koska niillä saavutetaan parempi kapasiteetti (Ämmälä 2001, 16). (Bajpai 2018, 422–423; Engstrand & Johansson 2009, 417; Höglund 2009, 76; Olson 2003, 6–8.)

4.3 Painelajittimen toimintaperiaate

Tyypillisessä painelajittimessa on sylinterin muotoinen sihtirumpu (Hautala ym. 1999, 255). Syöttö tapahtuu lajittimen yläosasta aksiaalisesti tai tangentaalisesti (Ämmälä 2001, 17). Lajittimen toiminnassa oleellisia virtauksia on useita: roottorin pyöriästä liikkeestä aiheutuu tangentaalinen virtaus lajittimen sisällä, akseptin poistovirtaus aiheuttaa radiaalista liikettä sihtirumpua kohti, kun taas rejekti poistuu aksiaalisesti (Hautala ym. 1999, 256–257). Tarvittaessa rejektiä voidaan laimentaa lajittimen alaosaan syötettävällä laimennusvedellä (Tervola ym. 2011, 446). Eri jakeisiin lajittelu tapahtuu pyöriävän roottorin aiheuttaman keskipakoisvoiman sekä lajittimen rakenteesta ja ope-roinnista johtuvan paine-eron avulla. Edellä mainittuja muuttamalla voidaan

kontrolloida akseptin ja rejektin laatua (Hautala ym. 1999, 256). Roottori kiihdyttää syötetyn massan virtausnopeutta ja massa ajautuu sylinterinmuotoista, raoilla tai rei'illä varustetun sihtikoria kohti, jolloin aksepti läpäisee sihtikorin aukot ja kulkeutuu akseptin poistoputkeen. Rejekti kertyy sihtikorin ja roottorin väliin ja kulkeutuu lajittimen alaosan kautta poistoputkeen. Kuvassa 4 esitetään lajittimen päävirtaukset yksinkertaistettuina. (Tervola ym. 2011, 445.)



Kuva 6. Lajittimen toimintaa kuvaava piirros (Asendrych ym. 2008, s. 44). F= syöttö, A= aksepti ja R= rejekti.

Lajittelussa aiemmin yleisten kaskadikytkentöjen käyttö on vähentynyt sitä mukaa, kun sihtien ja roottorien kehitys on mahdollistanut paremman lajittelutuloksen, samalla kun lajittelun kapasiteetti on noussut. Lajittimien määrää ja kokoa on pystytty vähentämään ja lajitteluprosessin ajettavuus on parantunut. (Hautala ym. 1999, 251–255).

4.4 Painelajitteluun vaikuttavat tekijät

Fraktioinnin lopputulokseen voidaan vaikuttaa useiden eri muuttujien kautta. Muuttujat voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan; massaan liittyvät, lajittimeen liittyvät sekä ajotapahtumaan liittyvät säätömuuttujat. Lähes säännönmukaisesti erottelutarkkuutta parantavat muutokset huonontavat lajittelun kapasiteettia. Painelajitteluprosessi onkin aina kompromissi laadun ja kapasiteetin suhteen. (Hautala ym. 2009, 300 ja 305; Jokinen 2007, 83; Ämmälä 2001,17.)

4.4.1 Massan ominaisuudet

Lajiteltavan massan ominaisuudet ovat tärkein tekijä muita parametreja valitessa ja säätäessä (Jokinen 2007, 55). Massan ominaisuuksista merkittävimpiä ovat sakeus ja kuitukoostumus; muita ovat pH, lämpötila, viskositeetti ja mahdollinen ilma massan seassa. Sakeus vaikuttaa suoraan akseptin ja rejektin sakeuksiin ja sitä kautta lajitinprosessin ajettavuuteen. Myös kuitujen koko ja käyttäytyminen lajittimessa vaikuttavat ulostulovirtojen koostumukseen sekä prosessin ajettavuuteen.

Sakeus

Hienolajittelussa lajiteltavan massan sakeus on 1–5 % (Valmet 2021; Andritz 2021; Hautala ym. 1999, 268). Höglundin (2009, 76) ja Hautalan ym. (1999, 268) mukaan sakeus on yleensä 1–1,5 %:n luokkaa, mutta 3–5 %:n sakeuksiakin käytetään (Tervola ym. 2011, 437). Sakeuden nosto parantaa lajittelu- prosessin kapasiteettia tiettyyn rajaan saakka, kunnes prosessin ajettavuus heikkenee rejektin sakeutumisen ja siitä johtuvan tukkeutumisen vuoksi. Rejektin sakeutuminen onkin määräävin tekijä syötön maksimisakeutta määritettäessä. Havusellun lajittelusakeudet ovat yleensä lehtipuuselluja alhaisempia, koska lehtipuusellun ajettavuus on korkeammilla sakeuksilla havusellua parempi. Hautalan ym. mukaan (2009, 304) sakeuden vaikutuksesta erottelutehokkuuteen on useita eriäviä mielipiteitä. (Krotscheck 2006, 577; Ämmälä ym. 2015.)

Kuitukoostumus

Kuitujen ominaisuudet, kuten pituus, notkeus, jauhautuneisuus ja verkottumisluku, vaikuttavat sakeuden ohella eniten lajittelu- prosessiin. Kiistatta tärkein erottelutekijä on kuitujen pituus, mutta kuitujen notkeudella on myös merkitystä. Pitkät kuidut jäävät helpommin rejektiin, mutta mikäli kuitujen notkeus lisääntyy, ne läpäisevät sihdin jäykkiä kuituja helpommin. (Krotscheck 2006, 578; Sloane ym. 2006, 71; Ämmälä ym. 2015, 224.)

Jokisen (2007, 56) mukaan laaja kuitujen pituusjakauma edesauttaa fraktiointia. Kapealla kokojakaumalla rejektin joukkoon voi päätyä paljon akseptikelpoista tavaraa, etenkin jos akseptin laatuvaatimukset ovat erityisen korkeat. Tällöin niitä tavoitellaan esimerkiksi säätämällä rejektisuhde korkeaksi, tai kapeampirakoisilla sihdeillä, jolloin hienompaakin kuitua rejektoituu. (Hautala ym. 1999, 270.)

Lämpötila ja viskositeetti

Lämpötilan kohotessa kuitujen notkeus lisääntyy ja massan viskositeetti alenee, jolloin turbulenttinen virtaus sihdissä kasvaa. Notkeudesta ja virtausten lisääntymisestä johtuen kuidut läpäisevät sihtirummun helpommin, joten lajittelun kapasiteetti kasvaa, mutta erottelutehokkuus huononee. (Krotscheck 2006, 577; Ämmälä 2001, 21.)

Ilma ja pH

Kohtalainen ilmamäärä sellun seassa ei yleensä vaikuta lajittimen toimintaan tyypillisissä lajitteluolosuhteissa. Korkeampi pH on yhteydessä kapasiteetin kasvuun ja erottelutehokkuuden huononemiseen joko alkalien voiteluominaisuuden tai kuitujen turpoamisen aiheuttamina. (Hautala ym. 2009, 306; Krotscheck 2006, 579; Ämmälä 2001, 21.)

4.4.2 Lajittimen ominaisuudet

Olemassa olevan lajittimen ominaisuuksia voidaan säätää käytännössä sihtikorin ja roottorin rakenteeseen liittyvillä valinnoilla. Erilaisiin lajittelutarpeisiin onkin vuosien varrella kehitetty lukuisia erilaisia roottori- ja sihtimalleja. (Hautala ym. 2009, 300; Krotscheck 2006, 563–573.)

Sihtikorin rakenne ja dynamiikka

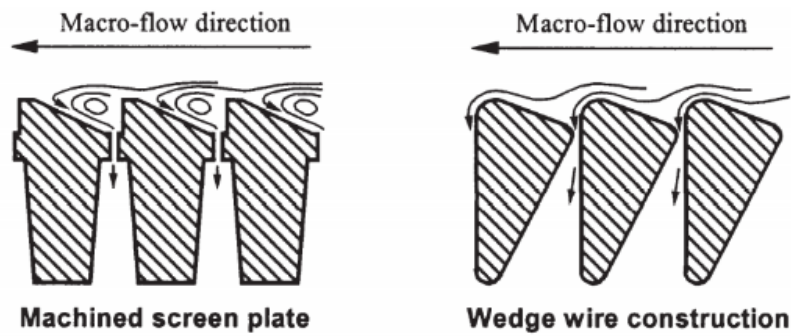
Sihtikorit voidaan jakaa karkeasti kahden tyyppiin: rako- tai reikäsihteihin. Sihdit voivat olla porattuja, lävistettyjä, työstettyjä, laserleikattuja tai kiilalankamalleja, sekä profiloituja tai sileäpintaisia. Sihtikorin ratkaisevin ominaisuus on sen aukkojen koko. Reikäkoko on hienolajittelussa yleensä 1–1,5 mm tai

rakoleveys 0,15–0,25 mm (Höglund 2009, 75), mutta jopa 0,06 mm rakosih-
tejä käytetään (Hautala ym. 1999, 256). Sihtikorin avoin pinta-ala vaikuttaa
suuresti sihdin kapasiteettiin. Aiemmin sihdit olivat sileäpintaisia ja niiden au-
kot tehtiin työstämällä, joka asetti rajoituksia sihdin aukkokokoon ja avoimeen
pinta-alaan. Yleisimmin käytettiin reikäsihtejä. 1980-luvulta alkaen on kehitetty
profiloituja sihtimalleja, joissa sihdin syötönpuoleisella pinnalla on pitkiä har-
janteita (kuva 5).



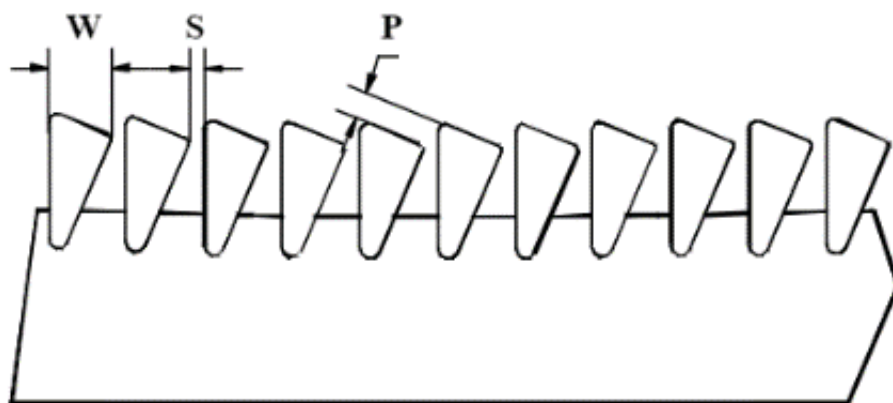
Kuva 7. Esimerkki profiloidusta reikäsihdistä.

Harjanteet aiheuttavat sihtikorin pinnalle turbulenttisia virtauksia, jotka paran-
tavat painesihdin kapasiteettia (kuva 6). Käytännössä turbulenssin ansiosta
yksittäisellä kuidulla on useampia mahdollisuuksia kulkeutua sihdin aukkoon.
Samalla erottelutarkkuus huononee, mutta tulosta voidaan parantaa valitse-
malla pienempiaukkoisen sihtikori, jolloin kapasiteetti on kuitenkin korkeampi
kuin sileäpintaisella, isompiaukkoisella sihtikorilla. Kiilalankamallien kehittämi-
sen myötä erottelutehokkuuden ja kapasiteetin suhde on edelleen parantunut.
(Hamelin ym. 2014; Jokinen 2007, 32; Hautala ym. 1999, 264–266; Hautala
ym. 2009, 302–303; Krotscheck 2006, 572–573; Wakelin & Corson 1995, 1.)



Kuva 8. Kuitujen ajautuminen työstetyn ja kiilalankamallisen profiloituneen sihtirummun läpi turbulenttisen virtauksen ajamana (Saint Amand 2001, 92).

Sloanen ym. (2006, 71) mukaan sileällä reikäsihdillä on mahdollista erotella eri fraktioita tarkemmin, verrattuna profiloituihin sihteihin. Karppisen (2021) mukaan sileällä, pienireikäisellä sihdillä saavutetaan helpommin riittävä rejektin sakeutuminen, joka on yhteydessä hyvään erottelutulokseen. Samankaltaisia tuloksia voidaan kuitenkin saada myös kapearakoisilla, profiloituilla sihtimalleilla (Wakelin & Corson 1995, 1). Tällöin painesihdin toimintaa voidaan säätää roottorin nopeutta muuttamalla, joka vaikuttaa lajitellun sellun ominaisuuksiin. Kuva 7 esittää lankarakosihdin poikkileikkausta, jossa kuvataan sihtimallin tärkeimmät ominaisuudet eli langan leveys, rakoleveys ja profiilin korkeus. Rakoleveys tai reikäkoko vaikuttaa siihen, missä suhteessa lajittelu jakautuu este- ja todennäköisyyslajittelun välillä. Langan leveyden tai reikien välisen etäisyyden on oltava riittävä suhteessa massan kuitukoostumukseen; pitkät kuidut voivat painua päistään kahden aukon läpi ja aiheuttaa sihdin tukkeutumista. Profiilin korkeus taas vaikuttaa sihdin pinnan virtausolosuhteisiin. (Hautala ym. 1999, 266; Krotscheck 2006, 573.)



Kuva 9. Lankarakosihdin poikkileikkaus (Ämmälä 2001, 19). W= langan leveys, S= rakoleveys, P= profiilin korkeus.

Sihtikorin muoto on sylinterimäinen, ja raot tai reikärivit ovat yleensä pystysuuntaisia. Kuvissa 8 ja 9 on eräs tässä työssä käytetyistä sihtimalleista, joka edustaa keskimääräistä hienolajittimen sihtikorin muotoilua.



Kuva 10. Lankarakosihti 0,20 mm raolla, langan leveys 4 mm ja profiilin korkeus 0,60 mm.



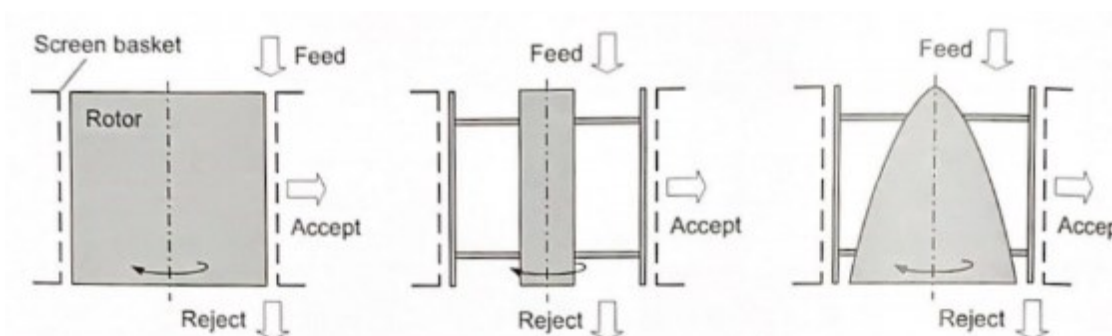
Kuva 11. Kuvan 8 sihti ulkopuolelta kuvattuna, lankojen kiilamaisuus erottuu.

Roottorin rakenne ja dynamiikka

Roottorin kehänopeuden ja massan nopeuden välinen ero on eräs hyvän lajitte-
 telutuloksen edellytyksistä (Hautala ym. 1999, 257). Roottorilla on painelajitti-
 messa kaksi päätehtävää; massan nopeuden kiihdytys ja sihdin pintaa puhdis-
 tavien impulssien tuottaminen. Roottorin pyörivä liike kiihdyttää lajittimeen
 syötetyn massan virtausnopeutta, jolloin massa ajautuu kohti sihtirumpua.
 Roottorin vaikutuksesta massan juoksevuus lisääntyy, partikkelien välinen
 vuorovaikutus vähenee ja niiden akseptoitumistodennäköisyys kasvaa. Root-
 torin ulokkeet aiheuttavat roottorin pyöriessä pumppaavaa liikettä, eli käytän-
 nössä massan virtausta sihdin aukoista takaisinpäin. Impulssit estävät sihdin
 tukkeutumista, koska niiden avulla rejekti irtoaa sihtikorin pinnalta ja aukoista
 kulkeutuen sihdin alaosaan kohti ja lopulta rejektilinjaan. (Hautala ym. 1999,
 266; Krotscheck 2006, 563–565; Ämmälä 2001, 17–18.)

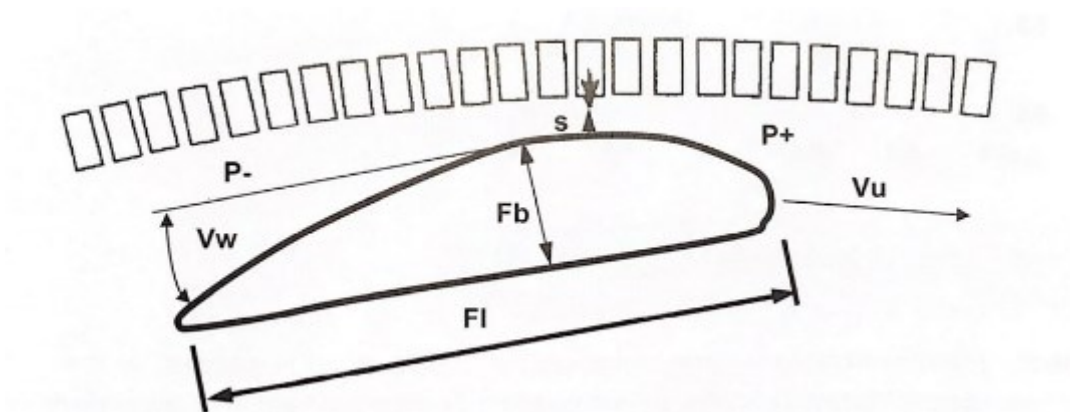
Roottorin muotoilu vaikuttaa painelajittimen virtausolosuhteisiin. Roottorityyp-
 pejä on useita, mutta ne voidaan jakaa rungon muotoilun perusteella umpinai-
 siin, avoimiin ja puoliavoimiin roottoreihin (kuva 10). Puoliavoin roottori mah-
 dollistaa tasaisen virtauspaineen sihtirumpua kohti koko lajittimen korkeudelta,
 kun taas sylinterin muotoisilla roottoreilla paine vähenee sihdin alaosaan kohti

sitä mukaa, kun osa syöttövirrasta läpäisee sihtirummun. (Hautala ym. 1999, 266–267; Krotscheck 573–575.)



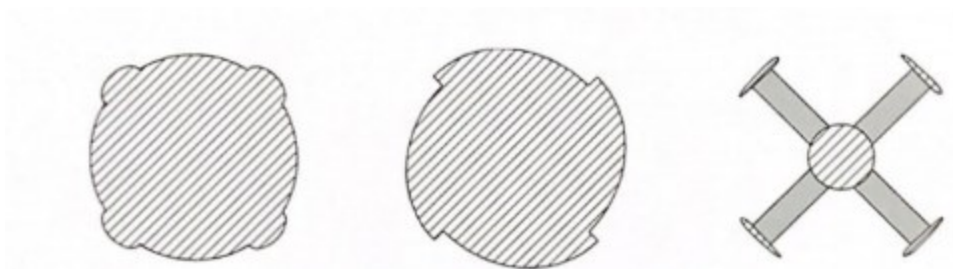
Kuva 12. Roottorityyppejä; vasemmalta umpinainen, avoin ja puoliavoin roottori (Krotscheck 2006, 564).

Roottorin ulokkeiden muotoilu (kuva 11) vaikuttaa erityisesti imupulssin keston ja voimakkuuteen, ja sitä kautta lajittimen virtauksiin ja kapasiteettiin.



Kuva 13. Roottorin muuttujat. P-=imupuoli, P+= painepuoli, Vw= foilin kulma, s= foilin välys, Vu= kehänopeus, Fl= foilin pituus ja Fb= foilin paksuus (Hautala ym. 2009, 301).

Kuplaroottorit ja lyhyillä ulokkeilla varustetut roottorit (kuva 12) aiheuttavat lyhyemmän pulssin ja matalamman takaisinvirtauksen. Pitemmillä ulokkeilla ja pykälillä varustetut roottorit aiheuttavat pitemmän ja tehokkaamman imupulssin, joka massan takaisinvirtauksen tehostumisen myötä puhdistaa sihtiä tehokkaammin ja ehkäisee rejektin sakeutumista. Näin ollen voimakkaamman imupulssin tuottavilla roottoreilla voidaan lajitella korkeammassa sakeudessa ilman sihtin tukkeutumista. (Krotscheck 2006, 573–575; Ämmälä ym. 2015.)



Kuva 14. Roottorimallien poikkileikkaukset; vasemmalla kupla-, keskellä pykälä- ja oikealla foiliroottori (Krotscheck 2006, 564).

4.4.3 Operaatioparametrit

Lajitinprosessin ohjausparametrejä ovat esimerkiksi syötön massavirtaus, rejektisuhde ja roottorin kehänopeus, joilla aikaansaadaan paine-ero sihdin yli. Akseptin virtausnopeus ei itsessään ole säätösuure, mutta muita parametrejä säätämällä se saadaan lajittelun kannalta optimaaliselle tasolle. Massan syötösakeus ja lämpötila ovat myös operaatioparametrejä, mutta niiden vaikutukset on esitelty kappaleessa 4.4 massan ominaisuuksien yhteydessä. Lajitteluprosessin säädöillä tavoitellaan mahdollisimman korkeaa kapasiteettia, prosessin ajettavuutta ja tehokkuutta mahdollisimman pienellä energiankulutuksella ja kuituhävikillä. (Hamelin ym. 2014; Krotscheck 2006, 572.)

Tilavuusrejektisuhde

Krotscheckin (2006) mukaan rejektisuhde on painelajittimen tärkein operaatioparametri. Rejektin sakeutuminen on lajitteluprosessin edellytys. Optimaalisen fraktiointituloksen saavuttamiseksi pieniaukkoisilla sihtikoreilla rejektin sakeutumiskertoimen (kappale 5.4.3) tulisi olla vähintään 2. Pelkkä vesi läpäisee sihtirummun kuituja todennäköisemmin, jolloin rejektin sakeus kasvaa (Hautala ym. 1999, 252). Rejektisuhteen nostaminen parantaa painesihdin erottelutehokkuutta ja ehkäisee sihdin tukkeutumista. Rejektisuhteen nostamisella on kuitenkin taloudellisia rajoituksia, koska rejektin jatkokäsittelyn kustannukset kasvavat rejektimäärän mukana. Painesihtien tyypillinen rejektisuhde on 10–25 %. Jokisen (2007, 47) mukaan pienempi rejektisuhde parantaa fraktioinnin valikoivuutta, mutta samalla heikentää ajettavuutta, koska rejektin voimakas sakeutuminen voi johtaa sihdin tukkeutumiseen. Laimennusveden syötöllä voi-

daan parantaa rejektin ajettavuutta, mutta runsas laimennusveden syöttö laimentaa myös akseptia (Karppinen, 2021). (Krotscheck 2006, 575; Olson 2001.)

Virtausnopeus aukkojen läpi

Lajittimen virtausnopeuksia säätämällä voidaan vaikuttaa sihdin syöttö- ja akseptipuolen väliseen paine-eroon, jolloin sihdin aukkojen läpi virtaavan massan nopeus muuttuu. Paine-eroa voidaan muuttaa säätämällä syöttövirtausta, rejektin virtausta, tai kuristamalla/avaamalla akseptilinjaa. Virtausnopeuden nosto lisää kapasiteettia ja akseptin sakeutta, mutta samalla huonontaa erottelutehokkuutta. Olsonin (2001) mukaan 0,5–1,0 m/s rakonopeudella saavutetaan paras erottelutehokkuus rakosihtien ollessa kyseessä, mutta reikäsihteillä fraktioinnin erottelutehokkuus ei Krotcheckin (2006) mukaan juurikaan riipu rakonopeudesta. (Hautala ym. 2009, 304; Jokinen 2007, 47; Ämmälä 2001, 19–20; Ämmälä ym. 2015, 224.)

Roottorin kehänopeus

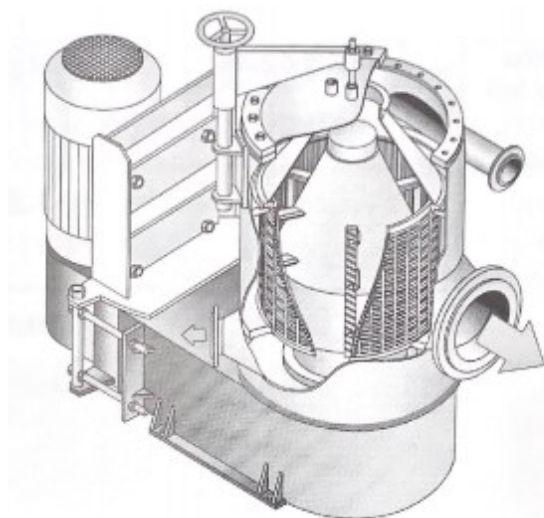
Roottorin kehänopeus on lajittimen operoinnissa tärkeä parametri. Roottorin kehänopeuden kasvattaminen voimistaa imupulssia ja lisää turbulenssia, sekä tehostaa massan ja kuitujen virtausta sihdin läpi ja pinnalta takaisinpäin. Roottorin nopeuden kasvattaminen lisää siis energiankulutusta ja kapasiteettia, mutta toisaalta myös pienentää lajittimen läpivirtauskapasiteettia, koska takaisinvirtaus voimistuu. Roottorivalmistajilla on malleilleen suositellut kehänopeusalueet, joiden sisällä kapasiteetin lisäys ei huononna erottelutehokkuutta merkittävästi. Yleisesti kehänopeudet ovat 10–40 m/s. Pitkien ja jäykkien kuitujen lajittelussa tarvitaan suurempia kehänopeuksia kuin lyhyiden ja notkeiden kuitujen lajittelussa. (Krotscheck 2006, 577–578; Ämmälä ym. 2015.)

5 KOKEELLINEN OSUUS

Kokeet suoritettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Savonlinnassa sijaitsevalla Kuitulaboratoriolla. Työssä käytetty painelajitin kytkeytyy Kuitulaboratorion pilottihallissa sijaitsevaan matalasakeusprosessilaitteistoon.

5.1 Käytetyt laitteet

Työssä käytettiin Andritz Moduscreen F1 -painelajitinta (kuva 13), johon massa syötetään tangentiaalisesti ja aksepti poistuu lajittimen ulkokehältä roottorin sijaitessa laitteen keskellä. Prosessiin kuuluu lajittimen lisäksi tilavuudeltaan 30 m³:n syöttösäiliö ja laimennusvesijärjestelmä. Lajittimen ulostulovirrat on mahdollista ohjata erilleen tai yhdistää joko varastosäiliöön tai takaisin syöttösäiliöön. Näytteenotto tapahtuu aksepti-, rejekti- ja syöttölinjoissa sijaitsevien käsikäyttöisten näytteenottohanojen kautta.



Kuva 15. Andritz Moduscreen F-lajitin (Hautala ym. 1999, 268).

5.2 Esikoe

Esikoeajo tehtiin Kuitulaboratoriolla toukokuussa 2021. Esikokeessa lajittimen roottorimalli ja sihtikori pidettiin vakiona, mutta ajoparametrejä, kuten roottorin kierroslukua, säädettiin kokeen aikana. Saatujen tulosten avulla määritettiin koepisteet varsinaiseen koesuunnitelmaan. Esikokeen tavoitteena oli lisäksi harjoitella lajittimen operointia sekä näytteenottotekniikkaa, jotta varsinaisen koeajon toteutus olisi sujuvaa ja siitä saatavat näytteet riittävän edustavia. Esikokeessa lajitteluun käytettiin eri massaa kuin varsinaisessa kokeessa, koska modifioitua massaa säästeltiin varsinaiseen kokeeseen.

5.2.1 Koejärjestelyt

Massa pulperoititiin ja pumpattiin varastosäiliöön koeajoa edeltävänä päivänä. Samalla massa laimennettiin lähelle tavoitesakeutta. Koeajopäivänä massan

kuiva-ainepitoisuus mitattiin standardin ISO 4119 mukaan, josta saadun tuloksen perusteella massa laimennettiin ennen koeajoa tavoitesakeuteen. Syötön sakeustavoite esikokeen alussa oli 1,8 % (vaihe 1), josta massaa laimennettiin vaiheittain 1,5 %:n (vaihe 2) ja 1 %:n (vaihe 3) sakeuksiin. Sihtikoriksi valittiin 0,20 mm:n rakosihti 4 mm:n langalla ja 0,6 mm:n profiililla. Fraktioinnissa myös sileä, pienireikäinen reikäsihti olisi ollut hyvä vaihtoehto (Karppinen 2021; Olson 2003, 5), mutta riittävän pienireikäistä sihtiä ei kuitenkaan ollut helposti saatavilla. Valitun rakosihdin muotoilulla löytyi useita eri rakoleveyden omaavia sihtikoreja, jolloin myöhemmässä vaiheessa pystyttiin vertailemaan pelkän rakoleveyden muutoksen vaikutuksia. Roottorina käytettiin umpinaista kuplaroottoria (14). Hauraan ja melko homogeenisen kuitukoostumuksen ollessa kyseessä kuplaroottorin vähäisempi turbulenssinmuodostus (Wakelin & Corson 1995, 2–3) on eduksi.



Kuva 16. Esimerkkikuva kuplaroottorista (Cascade 2017).

5.2.2 Esikokeen koesuunnitelma ja kulku

Koeajossa syötön tilavuusvirtaa, akseptia ja rejektiä pyrittiin säätämään eri rakonopeuksien ja rejektisuhteiden mukaan arvioituihin lukemiin (taulukko 4). Rejektisuhteen vaikutusta testattiin kolmella eri tasolla. Rejektisuhteet valittiin normaaliin ajoon soveltuvalta alueelta, rejektiin ollessa noin 20, 30 ja 40 % syöttövirrasta. Akseptin tilavuusvirta säädettiin kolmeen eri tilavuusvirta-arvoon, joista johdettuna akseptin rakonopeudeksi käytössä olleella sihtikorilla saatiin 0,8–1,2 m/s (kaava 1). Nopeudet valittiin kirjallisuudesta saatujen arvojen (Olson 2001, 261) sekä lajitinta aiemmin käyttäneiden kokemuksen perusteella. Säätö tehtiin syöttövirtauksen säädön jälkeen avaamalla akseptiputken

venttiiliä ja pienentämällä rejektiputken venttiilin avaumaa. Lajittimen ulostulovirrat ohjattiin esikokeessa takaisin syöttösäiliöön.

Taulukko 3. Lajittimen tavoiteparametrit.

Rakonopeus m/s	0,8			1			1,2		
Aksepti l/s	12,1			15,1			18,1		
Rejektisuhde %	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Syöttö l/s	15,2	17,3	20,2	18,9	21,6	25,2	22,6	25,9	30,2

Rakonopeuden laskeminen esitetään kaavassa 1.

$$v_r = \frac{\dot{V}_A}{A_s} \quad (1)$$

jossa	v_r	rakonopeus	[m/s]
	\dot{V}_A	akseptin tilavuusvirtaus	[m ³ /s]
	A_s	sihdin avoin pinta-ala	[m ²]

Roottorin säätöparametrit valittiin siten, että kierroksista kaavan 2 mukaan laskettu kehänopeus olisi viisi eri lukemaa välillä 10–30 m/s.

$$v_k = \frac{\pi * D * n}{60s} \quad (2)$$

jossa	v_k	kehänopeus	[m/s]
	π	piin arvo	[-]
	D	roottorin halkaisija	[m]
	n	roottorin kierrosluku	[rpm]

Roottorin tavoitenopeudet ja niiden mukaiset kierrosluvut esitetään taulukossa 5.

Taulukko 4. Roottorin ajoparametrit.

arvioitu tavoitenopeus m/s	12,16	15,2	20,26	25,33	29,99
rpm	600	750	1000	1250	1480

Laimennusveden käyttöä ei suositeltu tutkimusolosuhteissa, joten sitä ei käytetty ajoparametrina kokeessa (Karppinen 2021). Karppisen mukaan on lähes mahdotonta määrittellä, kuinka suuri osa rejektitilaan tulevasta laimennusvedestä menisi akseptin joukkoon. Tällöin fraktiointituloksen arviointia olisi erittäin vaikea tehdä luotettavasti.

Esikokeen aikana havaittiin, että koesuunnitelma olisi voinut olla selkeämmin tehty. Suuntaa antavan koesuunnitelmankin mukaan saatiin kuitenkin testattua lajittimen toiminta-alueetta vapaamman virtauksen alueelta aina sihdin tukkeutumispisteeseen saakka. Lajittelunäytteet otettiin prosessin säätämisen jälkeen, kun koepisteen ajotilanne oli tasaantunut. Esimerkiksi roottorin alhaisilla kehänopeuksilla sihti alkoi tukkeutua, jolloin ajo-olosuhteiden tasaantuminen ei ollut mahdollista, eikä tällöin näytteitäkään otettu. Syöttövirrasta otettiin ajon aikana 4 kpl näytteitä (S1-S4) eli jokaisen vaiheen alussa sekä koko koeajon lopussa. Aksepti- ja rejektinäytteet (A1-17 sekä R1-17) otettiin kaikkiaan 17 koepisteestä: koepisteet 1–4 vaiheessa 1, vaiheessa 2 koepisteet 5–9 ja kolmannessa vaiheessa koepisteet 10–17.

5.3 Varsinainen koeajo

Koeajo suoritettiin kesäkuussa 2021. Koeajossa testattiin sihtikorin ja säätöparametrien vaikutusta lajittelutulokseen. Lajiteltavan massan koostumuksen vaikutusta testattiin lajittelemalla kahta erilaisen kuitujakauman omaavaa massaa.

5.3.1 Koesuunnitelma

Lajittelukokeen ensimmäisessä vaiheessa (taulukko 5) käytettiin 0,12 mm rako-sihtiä, jossa langan leveys on 4 mm ja profiilin korkeus 0,6 mm. Käytetyn sihtikorin avoin pinta-ala on pienempi kuin esikokeessa käytetyllä sihdillä, joten lajittelu tehtiin esikoetta pienemmillä virtauksilla. Muutoin rakonopeus olisi kasvanut merkittävästi, joka olisi vaikuttanut fraktioinnin onnistumiseen. Toisin kuin esikokeessa, koesuunnitelmaa ei perustettu ennalta laskettujen tarkkojen rakonopeuksien varaan. Sen sijaan koesuunnitelman yksinkertaistamiseksi valittiin lajittimen toiminta-alueelta ja osapuilleen sopivalta rakonopeusasteikolta sopivat virtausmäärät syötölle. Koepisteet numeroitiin etukäteen selkeyden vuoksi, jolloin voitiin luopua kellonaikojen merkitsemisestä näytteisiin ja koeajokirjanpitoon. Esikokeen tulosten perusteella haluttiin tarkempaa tietoa

rejektisuhteen vaikutuksesta lajittelutulokseen 20 % ja 30 % välillä, joten testattiin myös 25 % rejektisuhteen vaikutusta. Sopivan roottorin kierrosluvun oletettiin esikokeen perusteella olevan välillä 1000–1480 rpm.

Taulukko 5. Koesuunnitelma, vaihe 1.

Massa 1	0,12 RAKOSIHTI							
Koepiste	1	2	3	4	5	6	7	8
Syöttö l/s	10				15			
Aksepti l/s	6	7	7,5	8	9	10,5	11,25	12
Rejkti	40 %	30 %	25 %	20 %	40 %	30 %	25 %	20 %
Rpm 1000–1480								

Koeajon toinen vaihe (taulukko 6) ajettiin 0,15 mm rakosihdillä, jonka langan leveys on 4 mm ja profiilin korkeus 0,6 mm. Virtausmääriä kasvatettiin sopivassa suhteessa, koska leveämpirakoisen sihdin avoin pinta-ala on suurempi ja siten rakonopeus pienempi kuin pienirakoisella sihdillä, jos syöttövirtaus olisi vakio.

Taulukko 6. Koesuunnitelma, vaihe 2.

Massa 1	0,15 RAKOSIHTI							
Koepiste	9	10	11	12	13	14	15	16
Syöttö l/s	20				25			
Aksepti l/s	12	14	15	16	15	17,5	18,75	20
Rejkti	40 %	30 %	25 %	20 %	40 %	30 %	25 %	20 %
Rpm 1000–1480								

Kolmannessa vaiheessa (taulukko 7) käytettiin samaa massaa kuin vaiheissa 1–2, mutta siihen sekoitettiin karkeampaa massaa ja ajettiin samat koepisteet kuin vaiheessa 2. Parametrien järjestys poikkesi aiemmista vaiheista siten, että syöttövirtauksen muutos tehtiin laskevaan suuntaan.

Taulukko 7. Koesuunnitelma, vaihe 3.

Massa 2	0,15 RAKOSIHTI							
Koepiste	17	18	19	20	21	22	23	24
Syöttö l/s	25				20			
Aksepti l/s	15	17,5	18,75	20	12	14	15	16
Rejkti	40 %	30 %	25 %	20 %	40 %	30 %	25 %	20 %
Rpm 1000–1480								

Neljäs vaihe tehtiin samalla massalla kuin vaihe 3, mutta ajettiin kuten vaihe 1, eli kapeampirakoisella sihtikorilla (taulukko 8). Syöttövirtauksen muutos tehtiin edelleen laskevaan suuntaan, kuten vaiheessa 3.

Taulukko 8. Koesuunnitelma, vaihe 4.

Massa 2	0,12 RAKOSIHTI							
Koepiste	25	26	27	28	29	30	31	32
Syöttö l/s	15				10			
Aksepti l/s	9	10,5	11,25	12	6	7	7,5	8
Rejekti	40 %	30 %	25 %	20 %	40 %	30 %	25 %	20 %
Rpm 1000–1480								

5.3.2 Koeajon kulku

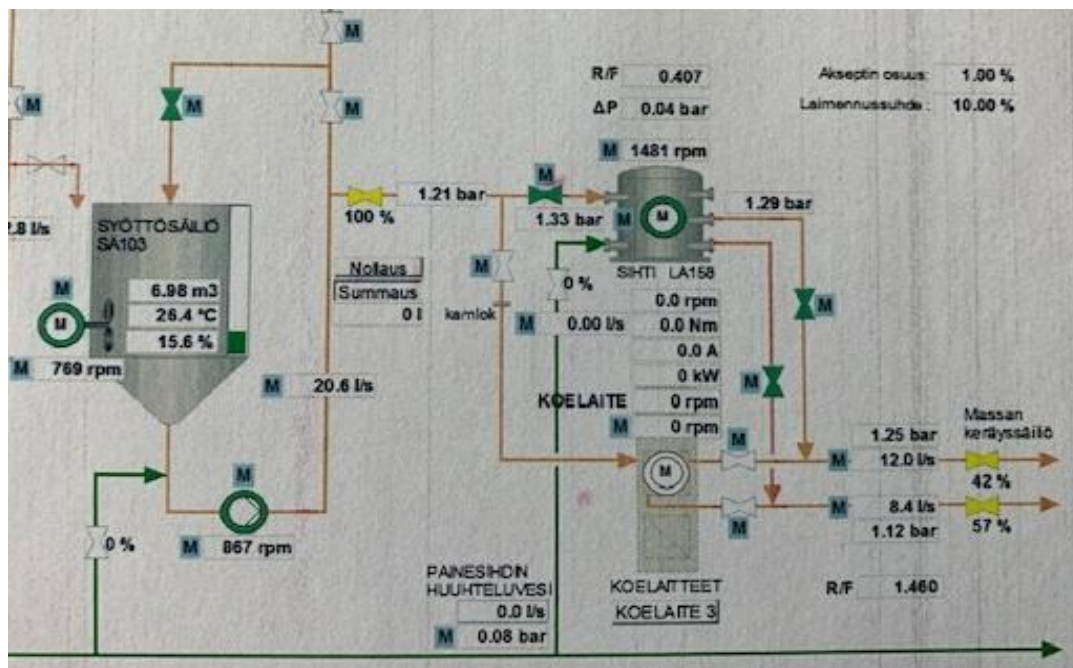
Koeajo suoritettiin lajittimen säätämisen kannalta loogisessa järjestyksessä, eli syöttövirtauksen säädön jälkeen rejektisuhdetta asteittain pienentämällä. Roottorin kierrosluvuksi haettiin alhaisin toimiva lukema, joka nopeassa ajotilanteessa oli mahdollista saavuttaa. Käytännössä roottorin kierrosluku oli vakio koepisteestä 3 alkaen. Koepisteet 1–3 ajettiin siten, että lajittimen ulostulovirrat ohjattiin erilliseen massasäiliöön. Näin voitiin arvioida puhtaasti vain kertaalleen lajitellun massan lajittelutulosta, ilman lajittelusta ja takaisinkierrätyksestä johtuvien kuitumuutosten vaikutuksia. Koepisteissä 4–6 massa ohjattiin jälleen lajittimesta erilliseen massasäiliöön, mutta syötetty massa oli jo kertaalleen koepisteissä 1–3 lajiteltua ja uudelleen yhdistettyä massaa. Koepisteet 7–32 ajettiin siten, että lajittimen ulostulovirrat kierrätettiin takaisin syöttösäiliöön. Kaikki suunnitellut koepisteet saatiin ajettua ja lisäksi ajettiin yksi ylimääräinen koepiste (16B) massa 1 koeajon lopussa. Syöttönäytteet otettiin jokaisen vaiheen alussa ja kummallakin massalla tehdyn koeajon lopuksi. Lisäksi koepisteessä 4 otettiin syötöstä näyte, kun sama massa otettiin toista kertaa kiertoon. Syöttönäytteitä otettiin yhteensä 7 kpl (S1, S4, S7, S16B, S17, S25 ja S32) ja aksepti- ja rejektinäytteitä kumpaakin 33 kpl (A1-A32 ja R1-R32).

5.4 Mittaustavat

Fraktiointitapahtuman ja lopputuloksen määrittelyssä käytetään erilaisia suhdelukuja ja laskukaavoja, esimerkiksi rejektin sakeutumiskerrointa ja massan läpäisysuhdetta. Osa tarvittavista tuloksista saadaan erilaisilla mittalaitteilla prosessista.

5.4.1 Prosessilaitteiston hallinta ja mittaustiedot

Prosessin ohjaaminen ja mittaustietojen seuraaminen tehtiin pilottihallin valvomossa tietokoneohjatun käyttöliittymän kautta (kuva 15). Prosessin venttiileistä osa on auki/kiinni toiminnolla, osa kuristussäädöllä varustettuja.



Kuva 17. Lajitteluprosessin käyttöliittymä.

Prosessin mittaukset tehtiin prosessiin kiinteästi sijoitetuilla mittalaitteilla (taulukko 9), joista tieto päivittyy käyttöliittymän ruudulle lähes reaaliajassa (viive 1 s). Tilavuusvirtauksien mittayksikkönä on l/s ja säiliön pinnankorkeus ilmoitetaan kuutiometreinä (m³).

Taulukko 9. Lajitinprosessin mittalaitteet.

Ominaisuus	Sijainti	Mittalaite/Valmistaja	Toiminto
Tilavuusvirtaus	syöttö-, aksepti- ja rejektilinjat	Krohne Optiflux 4000	Sähkömagneettinen virtausmittaus
Paine (oleelliset)	Syöttö- ja akseptipuoli lajittimessa	Endress Hauser	Paine-eromittaus
Lämpötila	Syöttösäiliö	Endress-Hauser	Termoelementti
Pinnankorkeus	Syöttösäiliö	Endress Hauser	Hydrostaattinen paine-eromittaus

5.4.2 Massan ominaisuuksien määrittäminen

Massan sakeus syöttösäiliössä määritettiin alustavasti pikatestillä sakeuden säätöä varten. Varsinainen kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen tehtiin syöttösäiliön näytteistä sekä lajittimen ulostulovirtojen näytteistä standardin ISO 4119 mukaisesti. Viskositeetin määrittäminen tehtiin syöttösäiliöstä otetuista näytteistä ISO 5351-1 -standardin mukaisesti. Saatuja arvoja verrattiin toisiinsa, jolloin nähtiin lajittelun sekä massan kierrätyksen aiheuttaman mekaanisen rasituksen vaikutus massan viskositeettiin.

Lajittelukokeista otettujen massanäytteiden kuitukoostumus analysoitiin Valmet FS5-kuituanalyysaattorilla. Laitteen analyysiohjelmasta saadaan tietoa näytteen kuitujakaumasta sekä kuitujen ominaisuuksista. Näistä lähempään tarkasteluun otettiin tämän työn kannalta merkittävimmät ominaisuudet, jotka on lueteltu oheisessa taulukossa (taulukko 10). Jokaisesta näytteestä analysoitiin varsinainen näyte sekä rinnakkaisnäyte. Laitteen ohjelma laskee jokaisen tutkittavan parametrin kohdalla varsinaisen ja rinnakkaisen näytteen keskiarvon. Keskiarvojen muodostaman tulosraportin luotettavuus on yksittäistä näyteanalyysiä parempi.

Taulukko 10. Työssä käytetyt kuituanalyysisuureet selityksineen (Valmet 2017 s. 33–34).

Lc(l) ISO	Pituuspainotettu keskikuitupituus, ISO 0,2-7,0 mm
Kuidun leveys, μm	Pituuspainotettu keskimääräinen kuidun leveys
Kinkki 1/m	Kibblewhiten kink-indeksin pohjalta laskettu suure, joka kuvaa kuituvaurioiden määrää ja laatua per metri
Hienoaine A, %	Hiutalemaisesta hienoaineesta (tyyppi A) prosenttiosuus mitattujen kappaleiden projektiopinta-alasta. Hienoaine A:han lasketaan kappaleet, joiden pituus on alle 0,2 mm
Hienoaine B, %	Lamellimaisesta hienoaineesta (tyyppi B) prosenttiosuus pituudesta. Hienoaineeseen B lasketaan kappaleet, joiden leveys on alle 10 μm ja pituus yli 0,2 mm. Näiden kappaleiden yhteispituus jaetaan kaikkien mitattujen, yli 0,2 mm pitkien kappaleiden yhteispituudella ja kerrotaan sadalla.
Alla kuvatut fraktiot	Fraktioiden prosenttiosuus pituuspainotetusta jakaumasta
Pituus < 0.2 mm, %	0–0.2 mm, leveys $\geq 10 \mu\text{m}$.
Pituus 0.2–0,60 mm, %	0.2–0.6 mm, leveys $\geq 10 \mu\text{m}$
Pituus 60–1,20 mm, %	0.6–1.2 mm, leveys $\geq 10 \mu\text{m}$
Pituus 1,20–2,00 mm, %	1.2–2.0 mm, leveys $\geq 10 \mu\text{m}$
Pituus 2,00–3,20 mm, %	2.0–3.2 mm, leveys $\geq 10 \mu\text{m}$
Pituus 3,20–7,60 mm, %	3.2–7.6 mm, leveys $\geq 10 \mu\text{m}$

5.4.3 Fraktiointitulosten analysointi

Mittaustietojen ja kuituanalyysitulosten tarkempi käsittely tehtiin erilaisten yhtälöiden avulla. Saatujen suhdelukujen ja indeksien avulla tehty koepisteiden vertailu huomioi mittausdatan kokonaisvaltaisemmin, kuin vertailtaessa pelkästään eri arvojen erotuksia (Jokinen 2007, 19–27; Ämmälä 2001, 22–26).

Massarejektisuhde RR_m (kaava 3) ilmaisee, kuinka suuri osuus syötetyn massan kuiva-aineesta rejektoituu lajittelussa:

$$RR_m = \frac{C_R \cdot \dot{V}_R}{C_F \cdot \dot{V}_F} \cdot 100 \quad (3)$$

jossa	RR_m	massarejektisuhde	[%]
	C_R	rejektin kuiva-ainepitoisuus	[%]
	\dot{V}_R	rejektin tilavuusvirtaus	[l/s]
	C_F	syötön kuiva-ainepitoisuus	[%]
	\dot{V}_F	syötön tilavuusvirtaus	[l/s]

Tilavuusrejektisuhde RR_V (kaava 4) ei sinällään kerro varsinaisesta kuitujen erottumisesta, mutta sitä voidaan käyttää yhtenä lajittelun operaatioparametrinä:

$$RR_V = \frac{\dot{V}_R}{\dot{V}_F} \cdot 100 \quad (4)$$

jossa	RR_V	tilavuusrejektisuhde	[%]
	\dot{V}_R	rejektin tilavuusvirtaus	[l/s]
	\dot{V}_F	syötön tilavuusvirtaus	[l/s]

Kapasiteettia arvioidaan massan läpäisyindeksi P_P :n avulla. Jokisen (2007, s. 27) mukaan massan läpäisyindeksin avulla voidaan verrata keskenään hyvin erilaisia lajittelutilanteita. P_P : määrittämiseen (kaava 5) käytetään rejektisuhteita:

$$P_P = \frac{\log RR_m}{\log RR_V} \quad 0 < P_P < 1 \quad (5)$$

jossa	P_P	massan läpäisyindeksi	[-]
	RR_m	massarejektisuhte	[%]
	RR_V	tilavuusrejektisuhte	[%]

Fraktiointitarkkuuden määrittämiseen käytetään fraktiointi-indeksilukua Q . Fraktiointi-indeksi vertaa aksepti- ja rejektijakeiden eroja jonkin kuitufraktion (kaava 6) tai massan ominaisuuden (kaava 7) suhteen. Indeksillä erotte-
lutarkkuudesta 0 ja 1 väliin sijoittuvalla luvulla, jossa 0 tarkoittaa ettei eroa ole lainkaan ja 1 tarkoittaa täydellistä erottumista. (Jokinen 2007, s. 21–22.)

$$Q_N = 1 - \frac{C_I}{C_{II}} \quad 0 < Q_N < 1 \quad (6)$$

$$Q_K = 1 - \frac{X_I}{X_{II}} \quad 0 < Q_K < 1 \quad (7)$$

jossa	Q_N	Nelsonin Q-indeksi	[-]
	Q_K	Karnisin Q-indeksi	[-]
	C	tietyn komponentin pitoisuus	[%]
	X	valittu laatuksiteeri, esim. kuidun pituus	
	I, II	viittaavat aksepti- ja rejektijakeisiin, jotka on valittava siten, että I-jakeen arvo on pienempi, jotta indeksiluvusta saadaan positiivinen	

Rejektin sakeutumiskerroin RTF kertoo lajittelutilanteesta huomioiden sekä tilavuus- että massarejektisuhteen. Nouseva sakeutumiskerroin indikoi sihdin tukkeutumispisteen lähestymistä, sekä akseptin laimenemista, joka taas kasvattaa pumppauksen ja vedenpoiston tarvetta (Wakelin & Corson 1995, 3). Jos tavoitteena on paras mahdollinen fraktiointitarkkuus, rejektin sakeutumiskertoimen tulisi kuitenkin olla riittävän korkea (Olson 2001, 255, 260).

RTF lasketaan kaavan 8 mukaisesti:

$$RTF = \frac{C_R}{C_F} = \frac{RR_m}{RR_V} \quad (8)$$

jossa	RTF	rejektin sakeutumiskerroin	[-]
	C_R	rejektin kuiva-ainepitoisuus	[%]
	C_F	syötön kuiva-ainepitoisuus	[%]
	RR_m	massarejektisuhde	[%]
	RR_V	tilavuusrejektisuhde	[%]

6 TULOKSET

Kappaleessa esitellään sekä esikokeen että varsinaisen lajittelukokeen tulokset. Kuituanalyyseistä saatu data on sijoitettu pääasiassa liitteisiin, ja työn kannalta oleelliset tiedot käydään läpi tekstissä.

6.1 Esikokeen tulokset

Taulukossa 11 kuvataan esikokeen toteutuneet parametrit. Esikokeessa massan lämpötila muuttui ensimmäisen päivän koeajossa $+1,8^{\circ}\text{C}$, jäähdyi yön aikana ja muuttui toisen päivän koeajon aikana $+0,8^{\circ}\text{C}$. Syötön tilavuusvirtauksissa oli jonkin verran hajontaa, vaihteluvälin ollessa 19,1–31,1 l/s. Akseptin virtaukset asettuivat melko tarkasti kolmeen tasoon 11,8–18,1 l/s välille ja rejektin virtaukset olivat 3,7–12,4 l/s. Roottorin kierrosluku oli enimmäkseen 1248–1481 rpm välillä, lukuun ottamatta kp 11:tä, jossa kierrosluku oli 751. Sihdin yli tapahtuva paineen muutos (Δbar) vaihteli 0 barin molemmin puolin enimmäkseen $-0,05$ ja $+0,09$ barin välillä, poikkeuksena tästä kp 4, jossa paine-eroa oli peräti $+0,16$ baria. Rejektisuhde (R/F) lajittimen käyttöliittymän ilmoittamana vaihteli välillä 19,1–41,5 %. Ensimmäisen vaiheen syötön massanäytteen sakeus oli 1,9 %, toisessa vaiheessa 1,51 % ja viimeisessä vaiheessa 0,99 %.

Taulukko 11. Esikokeen toteutuneet parametrit koepisteittäin.

Koe- piste	Säiliö	Syöttö	Aksepti	Rejekti	Lajitin rpm	Lajitin			Sakeus	
	°C	l/s	l/s	l/s		Δbar	R/F	Säätö	Toteutunut	
1	26,6	20,9	12,1	8,6	1480	0,03	0,408	1,80 %	1,90 %	
2	27,1	20,4	12	8,3	1249	0,08	0,405	1,80 %	1,90 %	
3	27,5	26,4	15,1	10,7	1480	0,09	0,407	1,80 %	1,90 %	
4	28,1	31,1	18	13	1480	0,16	0,415	1,80 %	1,90 %	
5	27,3	20,6	12	8,3	1481	-0,02	0,408	1,50 %	1,51 %	
6	27,7	25,3	15	10,1	1249	0,03	0,4	1,50 %	1,51 %	
7	27,8	21,4	15	5,8	1481	0,02	0,276	1,50 %	1,51 %	
8	28,1	30,5	18,1	12,4	1480	0,03	0,404	1,50 %	1,51 %	
9	28,4	26,2	18,1	7,6	1480	0,04	0,297	1,50 %	1,51 %	
10	24,8	20,4	12,1	8,2	1481	-0,05	0,403	1,00 %	0,99 %	
11	24,9	20,1	11,8	8,2	751	0,02	0,407	1,00 %	0,99 %	
12	24,9	25,3	15,1	10,1	1248	-0,01	0,401	1,00 %	0,99 %	
13	25	21,8	15,1	6,6	1249	-0,01	0,306	1,00 %	0,99 %	
14	25	19,1	15,1	3,7	1249	0,01	0,196	1,00 %	0,99 %	
15	25,3	30,2	18,1	11,8	1481	-0,01	0,394	1,00 %	0,99 %	
16	25,5	26,2	18,1	7,9	1480	-0,01	0,3	1,00 %	0,99 %	
17	25,6	22,8	18,1	4,4	1249	0,03	0,191	1,00 %	0,99 %	

Rakonopeudet laskettiin akseptin tilavuusvirtauksista kaavan 9 mukaisesti:

$$v_r = \frac{0,0121 \text{ m}^3/\text{s}}{0,0151 \dots \text{ m}^2} \approx 0,80 \text{ m/s} \quad (9)$$

Toteutuneet rakonopeudet olivat alimmillaan 0,78 m/s ja korkeimmillaan 1,20 m/s (taulukko 12).

Taulukko 12. Esikokeen rakonopeudet sihdin läpi.

Koepiste	Rakonopeus m/s	Koepiste	Rakonopeus m/s
1	0,80	10	0,80
2	0,79	11	0,78
3	1,00	12	1,00
4	1,19	13	1,00
5	0,79	14	1,00
6	0,99	15	1,20
7	0,99	16	1,20
8	1,20	17	1,20
9	1,20		

Kehänopeudet (m/s) laskettiin roottorin kierrosluvuista kaavalla 10 esimerkin mukaisesti:

$$v_k = \frac{\pi * 0,387m * 751}{60s} = 15,22 \text{ m/s} \quad (10)$$

Toteutuneet kehänopeudet olivat 15,22–30,01 m/s (taulukko 13). Vaikka kehänopeus n. 20 m/s testattiin, ko. kierrosluvun kohdalla ei otettu näytteitä. Alhaisinta, 600 rpm tasoa ei saavutettu koeajossa.

Taulukko 13. Roottorin kierrosluvut ja kehänopeudet esikokeessa.

arvioitu tavoitenopeus m/s	12,16	15,2	20,26	25,33	29,99
tavoite, rpm	600	750	1000	1250	1480
roottorin ohjaussäätö	15.5	23	36	49	61
toteutunut rpm	-	751	997	1249	1481
toteutunut kehänopeus, m/s	-	15,22	20,20	25,31	30,01

6.2 Esikokeen massa-analyysitulokset

Esikokeen syöttönäytteiden perusteella massan koostumuksessa ja kuitujen ominaisuuksissa tuli jonkin verran muutoksia kokeen aikana (taulukko 14). Esimerkiksi Kink-luku pieneni asteittain ollen alussa 3349 ja lopuksi 2554. Massan viskositeetti laski 848 → 836.

Taulukko 14. Esikokeen syöttönäytteiden analyysitulokset.

Näyte	S1	S2	S3	S4
Lc(l) ISO, mm	2,018	2,076	2,066	2,062
Kuidun leveys, µm	30,29	30,37	30,83	30,68
Kiharus, %	12,17	9,84	9,29	9,02
Kinkki 1/m	3349	2667	2592	2554
Hienoaine A, %	13,84	13,32	13,91	13,84
Hienoaine B, %	10,33	7,58	7,76	7,7
Pituus < 0.2 mm, %	15,4	14,9	15,8	15,7
Pituus 0.2–0,60 mm, %	11	10,6	10,5	10,7
Pituus 60–1,20 mm, %	12,4	11,9	11,5	11,7
Pituus 1,20–2,00 mm, %	18,8	18,2	18,5	17,8
Pituus 2,00–3,20 mm, %	29,2	29,4	29,6	30
Pituus 3,20–7,60 mm, %	13,3	14,9	14,2	14,2
Kuiva-aine %	1,9	1,51	0,99	0,98
Viskositeetti	848			836

Esikokeen näytteiden analyysituloksissa lukemat vaihtelivat koepisteittäin melko paljon. Tuloksissa erot akseptin ja rejektin välillä ovat lähes säännömukaisesti siten, että kuitujen suurempaan kokoon ja massan kuiva-ainepitoisuuteen liittyvissä määritelmässä akseptin arvo on pienempi ja rejektin arvo on suurempi. Vastaavasti Kink-luvun, hienoainepitoisuuslukemien, fibrillaation sekä kolmen lyhimmän kuitufraktion osalta akseptinäytteissä oli suuremmat arvot kuin vastaavissa rejektinäytteissä. Vaiheen 1 tulokset kuvataan koepisteittäin jaoteltuina ohessa (taulukko 15).

Taulukko 15. Esikokeen vaihe 1 näytteiden analyysitulokset.

Näyte	A1	R1	A2	R2	A3	R3	A4	R4
Lc(l) ISO, mm	1,625	2,182	1,661	2,141	1,752	2,176	1,82	2,192
Kuidun leveys, µm	28,47	30,6	28,64	30,59	28,84	30,81	29,2	30,72
Kinkki 1/m	3288	2739	3094	2682	2925	2646	2807	2545
Hienoaine A, %	24,88	10,03	25,29	10,69	23,09	10,22	20,78	10,62
Hienoaine B, %	13,57	8,25	12,91	8,49	12,14	7,6	10,5	7,62
Pituus < 0.2 mm, %	27,3	11	27,29	11,7	25,6	11,3	23,2	11,8
Pituus 0.2–0,60 mm, %	15,5	9	15,1	9,6	14,4	9,2	13,2	9
Pituus 60–1,20 mm, %	14,3	10,8	13,6	11,2	13,2	11	12,8	11,1
Pit. 1,20–2,00 mm, %	17,3	18,9	16,8	18,6	16,6	18,2	18,1	17,8
Pit. 2,00–3,20 mm, %	19,4	33	19,8	32,7	22,2	33,5	23,8	32,7
Pit. 3,20–7,60 mm, %	6,2	17,2	6,9	16,1	8,2	16,9	9	17,7
Kuiva-aine %	0,71	3,56	0,65	3,56	0,82	3,59	0,97	3,37

Esikokeen 2. vaiheen aksepti- ja rejektinäytteiden analyysitulokset noudattelivat pääpiirteittäin vaiheen 1 tasoja pienin poikkeuksin (taulukko 16).

Taulukko 16. Esikokeen 2. vaiheen näytteiden analyysitulokset.

Näyte	A5	R5	A6	R6	A7	R7	A8	R8	A9	R9
Lc(l) ISO	1,675	2,196	1,656	2,161	1,643	2,207	1,722	2,17	1,711	2,212
Kuidun leveys, µm	28,58	30,96	28,47	30,77	28,55	31,25	29,07	31,12	29,01	31,15
Kinkki 1/m	2884	2533	2930	2553	2926	2551	2832	2499	2832	2461
Hienoaine A, %	24,24	9,9	24,59	10,27	23,83	9,29	21,87	10,32	22,08	9,47
Hienoaine B, %	11,67	6,93	11,96	7,18	11,32	6,53	10,54	7,05	10,33	6,56
Pituus < 0.2 mm, %	26,8	10,9	27	11,3	26,2	10,3	24,3	11,5	24,5	10,5
Pituus 0.2–0,60 mm, %	15,3	9,2	15,3	9,1	15,4	8,8	14,3	9,6	14,4	8,9
Pituus 60–1,20 mm, %	13,7	11	13,8	11,3	14,2	10,8	13,7	11	14	10,6
Pituus 1,20–2,00 mm, %	16,9	17,7	17	18,4	17,5	18,5	18	18,1	17,8	17,7
Pit. 2,00–3,20 mm, %	20,3	33,5	20,2	33,8	20,2	33,4	22,5	32,6	21,9	34,2
Pit. 3,20–7,60 mm, %	7,1	17,7	6,7	16,1	6,5	18,2	7,2	17,2	7,5	18,2
Kuiva-aine %	0,6	2,59	0,62	2,65	0,64	3,24	0,69	2,45	0,68	2,99

Taulukossa 17 on lueteltu esikokeen 3. vaiheen analyysitulokset. Koepisteitä on hieman enemmän kuin edellisissä vaiheissa.

Taulukko 17. Esikokeen 3. vaiheen analyysitulokset.

Näyte	A10	R10	A11	R11	A12	R12	A13	R13
Lc(l) ISO	1,712	2,246	1,707	2,187	1,688	2,214	1,708	2,25
Kuidun leveys, μm	28,9	31,1	29,13	30,95	28,8	31,32	28,94	31,27
Kinkki 1/m	2788	2346	2819	2464	2843	2385	2501	2351
Hienoaine A, %	22,62	9,72	23,7	10,28	23,21	9,75	22,33	9,15
Hienoaine B, %	10,79	6,62	11,06	6,99	10,8	6,6	10,54	6,46
Pituus < 0.2 mm, %	25	10,9	26,4	11,4	25,7	10,9	24,8	10,1
Pit. 0.2–0,60 mm, %	14,8	8,6	14,8	9,6	15,1	9,1	14,9	8,4
Pituus 60–1,20 mm, %	13,4	10,4	13,2	10,9	13,7	10,8	13,6	10,4
Pit. 1,20–2,00 mm, %	17,2	17,9	16,7	17,6	17,4	18	17,4	17,8
Pit. 2,00–3,20 mm, %	22,1	33,5	21,3	32,8	20,9	33,2	22	34,3
Pit. 3,20–7,60 mm, %	7,5	18,8	7,5	17,7	7,3	18,2	7,4	19
Kuiva-aine %	0,46	1,91	0,42	1,83	0,44	1,82	0,45	2,19
Näyte	A14	R14	A15	R15	A16	R16	A17	R17
Lc(l) ISO	1,67	2,273	1,716	2,214	1,689	2,252	1,728	2,231
Kuidun leveys, μm	28,92	31,18	28,99	31,12	28,94	31,5	29,27	31,5
Kinkki 1/m	2875	2308	2830	2369	2824	2353	2808	2355
Hienoaine A, %	23,08	8,24	22,18	9,78	22,27	9,03	21,28	8,14
Hienoaine B, %	11,03	6	10,57	6,49	10,75	5,97	10,07	6,17
Pituus < 0.2 mm, %	25,5	8,9	24,7	11,1	24,6	10	23,7	8,9
Pituus 0.2–0,60 mm, %	15,1	8,2	14,7	8,6	14,9	8,2	14,3	8
Pituus 60–1,20 mm, %	14,3	9,7	13,7	10,8	14,1	10,3	13,9	10,2
Pituus 1,20–2,00 mm, %	17	18,8	17,4	18,3	18	18,3	18,1	19,1
Pituus 2,00–3,20 mm, %	21,5	34,7	22	33,4	21,1	34,4	22,5	36,1
Pituus 3,20–7,60 mm, %	6,6	19,7	7,6	17,8	7,4	18,9	7,7	17,7
Kuiva-aine %	0,46	3,05	0,52	1,96	0,51	2,04	0,48	2,88

6.3 Varsinaisen lajittelukokeen tulokset

Lajittelukokeen koepisteittäin toteutuneet arvot esitetään taulukossa 18. Alku-
peräistä tuloskirjanpitoa on pelkistetty selkeyden vuoksi, joten taulukosta löy-
tyy vain analysoinnin kannalta merkittävimmät parametrit. Massan lämpötila
nousi koeajon aikana ollen alussa 23,1°C ja lopussa 25,1°C. Tilavuusvirtauk-
sissa ja rejektisuhteissa oli hieman vaihtelua koesuunnitelman tarkkoihin luke-
miin verrattuna. Paine-ero sihdin yli vaihteli -0,03–0,03 barin välillä. Koepis-
teissä 1–2 roottorin kierrosluku oli 1249 rpm ja koepisteestä 3 alkaen 997–998
rpm.

Taulukko 18. Lajittelukokeen toteutuneet parametrit.

massa 1 Koepiste	Säiliö lämpö °C	Syöttö l/s	Aksepti l/s	Rejekti l/s	rpm	Lajitin Δbar	R/F
1	23,1	9,7	5,7	3,8	1249	-0,01	0,398
2		10,2	7	3	1249	-0,01	0,285
3		9,6	7,5	1,8	998	0,01	0,192
4		10,1	7,9	2	998	-0,01	0,201
5		15	8,9	6,1	997	-0,01	0,407
6		15,5	10,5	5	997	0	0,313
7		15,2	11,3	3,8	997	0	0,251
8		15,2	11,9	3,1	998	0,01	0,206
9		19,7	11,9	7,6	997	-0,03	0,388
10		19,9	13,9	5,8	997	-0,02	0,297
11		20,1	15	4,9	997	-0,02	0,245
12		20,3	16	4	997	-0,01	0,199
13		25	14,9	10,1	996	-0,01	0,403
14	24	25,1	17,5	7,5	997	0	0,297
15		25	18,7	6,2	996	0	0,249
16	24,1	25,2	20,1	5,1	997	0,01	0,203
16B	24,2	25,2	21,3	3,7	997	0,01	0,147
massa 2 Koepiste	Säiliö lämpö	Syöttö l/s	Aksepti l/s	Rejekti l/s	rpm	Lajitin Δbar	R/F
17	24,4	25,2	14,7	10,2	997	0	0,405
18		25,1	17,4	7,5	996	0,01	0,297
19		25	18,7	6,3	997	0,02	0,252
20	24,5	25,5	20	5,3	997	0,03	0,206
21		20,4	12	8,1	997	-0,02	0,398
22		20,1	13,7	6	997	-0,01	0,3
23	24,6	20,2	15	5,1	997	-0,01	0,253
24	24,7	20,3	16	4,1	997	0	0,201
25	24,8	15	8,9	6	997	-0,01	0,401
26		15,1	10,5	4,4	997	0	0,293
27		15,2	11,2	3,8	997	0,01	0,25
28		15	11,9	3	997	0,01	0,202
29	25	9,8	5,8	3,9	998	-0,01	0,401
30		10	7	3	998	-0,01	0,302
31		10	7,5	2,5	998	-0,01	0,247
32	25,1	10,1	8	1,9	997	-0,01	0,189

Lajittelukokeen toteutuneet rakonopeudet vaihtelivat 0,6 m/s ja 1,9 m/s välillä (taulukko 19).

Taulukko 19. Lajittelukokeen toteutuneet rakonopeudet.

Koepiste	Rakonopeus m/s	Koepiste	Rakonopeus m/s
1	0,6	17	1,3
2	0,8	18	1,5
3	0,8	19	1,6
4	0,9	20	1,7
5	1,0	21	1,0
6	1,1	22	1,2
7	1,2	23	1,3
8	1,3	24	1,4
9	1,0	25	1,0
10	1,2	26	1,1
11	1,3	27	1,2
12	1,4	28	1,3
13	1,3	29	0,6
14	1,5	30	0,8
15	1,6	31	0,8
16	1,7	32	0,9
16B	1,9		

6.4 Lajittelukokeen massa-analyysitulokset

Lajittelukokeen syöttösäiliönäytteiden tulokset, joista S1-S16B ovat massa 1 näytteitä ja S17-S32 massasta 2, kuvataan oheisessa taulukossa (taulukko 20). Näytteiden sakeuksissa ei ollut merkittäviä eroja kuiva-ainepitoisuuden vaihdellessa 1,72 % ja 1,87 % välillä. Kummankin massan viskositeetti pysyi suunnilleen samana koeajon aikana, massan 2 viskositeetti hieman korkeammalla tasolla verrattuna massaan 1.

Taulukko 20. Lajittelukokeen syöttönäytteiden analyysitulokset.

Näyte	S1	S4	S7	S16B	S17	S25	S32
<i>Lc(l) ISO, mm</i>	0,874	0,823	0,789	0,738	0,825	0,794	0,763
<i>Kuidun leveys, µm</i>	28,93	28,74	28,78	28,76	28,88	28,99	28,81
<i>Kinkki 1/m</i>	3887	3738	3726	3571	3522	3420	3384
<i>Hienoaine A, %</i>	37,34	39,47	40,28	41,74	42,86	42,63	46,82
<i>Hienoaine B, %</i>	1,06	1,08	1,02	1,09	1,13	1,21	1,27
<i>Pituus < 0.2 mm, %</i>	33,8	35,6	36,6	38,7	38,9	39,9	43,1
<i>Pituus 0.2–0,60 mm, %</i>	32	33,5	34,3	35,6	33,8	35,2	34,7
<i>Pituus 60–1,20 mm, %</i>	18,4	17,7	16,8	15,6	14,8	14	12,6
<i>Pituus 1,20–2,00 mm, %</i>	10,1	8,5	8	6,5	7,2	5,6	5,1
<i>Pituus 2,00–3,20 mm, %</i>	5	3,9	3,6	2,9	4,3	4,1	3,4
<i>Pituus 3,20–7,60 mm, %</i>	0,7	0,9	0,6	0,6	1,1	1,2	1,2
<i>Kuiva-aine %</i>	1,85	1,72	1,76	1,73	1,84	1,87	1,84
<i>Viskositeetti</i>	239			249	290		289
<i>pH</i>	3,96						6,35

Lajittelukokeen näytteistä tehtyjen kuituanalyysien ja kuiva-ainepitoisuusmäärittysten tulokset esitetään taulukoissa 25–28 (liitteet 1–4). Työn kannalta tärkeimmät kriteerit eli kuidun pituuspainotteisen pituuskeskiarvon, kink-luvun, leveysarvojen, pituusfraktioiden sekä kuiva-ainepitoisuuksien rivit on korostettu.

6.4.1 Tuloksista johdetut vertailuluvut

Näytteistä tehtyjen analyysitulosten perusteella laskettiin koepisteittäin massarejektisuhde, tilavuusrejektisuhde, rejektin sakeutumiskerroin sekä massan läpäisyindeksi. Massarejektisuhde RR_m laskettiin kaavan 11 mukaisesti:

$$RR_m = \frac{2,63\% \cdot 3,8 \frac{l}{s}}{1,85\% \cdot 9,7 \frac{l}{s}} \cdot 100 \approx 56\% \quad (11)$$

Tilavuusrejektisuhde RR_V laskettiin kaavalla 12:

$$RR_V = \frac{3,8 \frac{l}{s}}{9,7 \frac{l}{s}} \cdot 100 \approx 39\% \quad (12)$$

Massan läpäisyindeksi P_P laskettiin kaavalla 13:

$$P_P = \frac{\log(56\%)}{\log(39\%)} \approx 0,62 \quad (13)$$

Rejektin sakeutumiskerroin RTF laskettiin kaavan 14 mukaan:

$$RTF = \frac{2,63\%}{1,85\%} \approx 1,42 \quad (14)$$

Johdannaistulokset esitetään koepisteittäin massan 1 osalta taulukossa 21 ja massan 2 osalta taulukossa 22. Massan läpäisyindeksi- ja rejektin sakeutumiskerroin-riveistä on kummankin massan kohdalla korostettu viisi suurinta arvoa. Tilavuusrejektisuhdetulokset ovat 0,01 %-yksikön tarkkuudella tavoitearvossa, paitsi koepiste 3 kohdalla rejektisuhde on 0,06 %-yksikköä tavoitearvoa pienempi.

Taulukko 21. Massa 1 tuloksista johdetut vertailuluvut.

Massa 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	16B
RR _m	0,56	0,45	0,26	0,33	0,54	0,45	0,36	0,30	0,46	0,36	0,31	0,26	0,47	0,36	0,31	0,28	0,20
RR _v	0,39	0,29	0,19	0,20	0,41	0,32	0,25	0,20	0,39	0,29	0,24	0,20	0,40	0,30	0,25	0,20	0,15
P _p	0,62	0,65	0,81	0,68	0,68	0,71	0,74	0,75	0,82	0,82	0,83	0,82	0,84	0,85	0,84	0,80	0,85
RTF	1,42	1,54	1,74	1,68	1,34	1,39	1,44	1,48	1,19	1,25	1,27	1,33	1,15	1,20	1,24	1,27	1,33

Taulukko 22. Massa 2 tuloksista johdetut vertailuluvut.

Koepiste	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
RR _m	0,50	0,38	0,28	0,29	0,49	0,39	0,35	0,29	0,52	0,40	0,36	0,30	0,53	0,43	0,39	0,31
RR _v	0,40	0,30	0,25	0,21	0,40	0,30	0,25	0,20	0,40	0,29	0,25	0,20	0,40	0,30	0,25	0,19
P _p	0,76	0,79	0,91	0,79	0,76	0,79	0,77	0,77	0,72	0,74	0,74	0,75	0,69	0,69	0,69	0,71
RTF	1,24	1,28	1,13	1,39	1,24	1,29	1,38	1,44	1,29	1,37	1,44	1,50	1,33	1,44	1,54	1,63

Fraktiointitulosten vertailua varten aksepti- ja rejektijakeiden väliltä laskettiin fraktiointi-indeksi Q kaavojen 15 ja 16 mukaan:

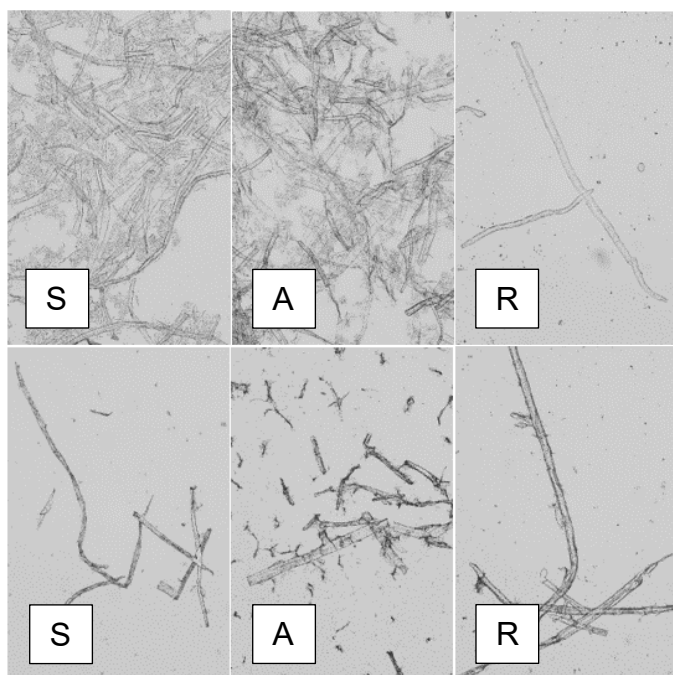
$$Q_N = 1 - \frac{1,35\%}{2,63\%} \approx 0,487 \quad (15)$$

$$Q_K = 1 - \frac{28,38\mu m}{29,29\mu m} \approx 0,031 \quad (16)$$

Koska Q-indeksi liittyy enemmänkin tulosten analysointiin, eikä ole itsessään lajittelutulos, lajittelukokeen tuloksista lasketut Q-indeksit tärkeimpien ominaisuuksien osalta kuvataan taulukoituna seuraavassa luvussa tulosanalyysin yhteydessä.

6.5 Mikroskopia

Näytteitä tarkasteltiin myös mikroskoopilla (Kuva 18). Kuvassa on kahdesta koepisteestä vasemmalla syöttönäyte, keskellä fraktioitu aksepti ja oikealla rejektinäyte.



Kuva 18. Fraktiointinäytteitä mikroskooppitarkastelussa.

Näytteet kuvattiin samalla suurennoksella (1000x), mutta osaa näytteistä laimennettiin tarkastelua varten. Syöttönäytteissä on nähtävissä hienoainesta ja kaiken pituisia kuituja, mutta fraktiointin jälkeen otetuissa näytteissä kuitujakauma on muuttunut.

7 TULOSTEN ANALYSOINTI

Kuituanalyysien perusteella modifioidun selluloosan lajittelussa voidaan saada toivottuja tuloksia, vaikka kuitujakauma olisikin hienoainespainotteinen.

7.1 Parametrien vaikutus varsinaisen koeajon tuloksissa

Akseptin ja rejektin koepistekohtaisista eroista kertovien Q-indeksitulosten vertailussa käytettiin työkaluna tulosdatan visualisointia taulukoiden solujen taustaväriin avulla, jotta eri koepisteiden paremmuutta oli helpompi verrata. Solujen taustaväri perustuu Excel-tilukkolaskentaohjelman ”ehdollinen muotoilu” -toimintoon. Väriskaala liukuu punaisesta keltaisen kautta vihreään, ja väri indikoi solun arvon sijoittumista suhteessa muihin saman rivin arvoihin. Pienin arvo rivillään on punaisin, keskimääräinen arvo keltaisin ja suurin arvo vihrein. Näin ollen vihreä väri yhdistyy parempaan erottelutulokseen ja rakonopeuteen, keltainen keskimääräiseen ja punainen huonompaan.

Taulukosta 23 on nähtävissä, että massan 1 osalta koepiste 1 erotteli keskimääräisesti parhaiten lähes kaikkia tutkittuja ominaisuuksia, tärkeimpänä niistä pisin kuitujae eli 3,20–7,60 mm:n kokoluokka. Ainoastaan 0,20–0,60 mm:n jakeessa erottelutulos oli heikompi. Kapasiteettia indikoiva P_P-indeksi oli kuitenkin kyseisessä koepisteessä heikoin. Tämä osoittaa todeksi aiemmin mainitun seikan, että lajittelutapahtuma on kompromissi erottelutarkkuuden ja -kapasiteetin välillä.

Taulukko 23. Massa 1 koepisteiden Q-indeksivertailu.

Massa 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	16B
Lc(l) ISO, mm	0,287	0,239	0,245	0,250	0,217	0,215	0,204	0,231	0,233	0,257	0,238	0,254	0,206	0,227	0,229	0,238	0,243
Kuidun leveys, µm	0,031	0,022	0,024	0,023	0,021	0,023	0,018	0,020	0,015	0,016	0,016	0,022	0,013	0,018	0,013	0,021	0,020
Kinkki 1/m	0,022	0,026	0,016	0,002	0,011	0,005	0,001	0,006	0,009	0,016	0,019	0,018	0,016	0,017	0,019	0,012	0,004
Hienoaine A, %	0,274	0,323	0,341	0,314	0,229	0,194	0,197	0,251	0,208	0,100	0,182	0,216	0,069	0,118	0,096	0,142	0,173
Hienoaine B, %	0,409	0,333	0,298	0,295	0,236	0,339	0,200	0,310	0,158	0,202	0,217	0,222	0,215	0,233	0,205	0,250	0,256
Pituus < 0.2 mm, %	0,286	0,319	0,328	0,314	0,230	0,199	0,191	0,228	0,197	0,103	0,193	0,207	0,092	0,140	0,104	0,145	0,175
Pit. 0.2 - 0,60 mm, %	0,080	0,044	0,072	0,069	0,052	0,082	0,063	0,067	0,083	0,152	0,097	0,109	0,115	0,091	0,108	0,121	0,104
Pit. 60 - 1,20 mm, %	0,196	0,229	0,236	0,237	0,183	0,152	0,154	0,197	0,177	0,100	0,167	0,176	0,151	0,105	0,066	0,159	0,160
Pit. 1,20 - 2,00 mm, %	0,522	0,453	0,459	0,461	0,404	0,368	0,378	0,373	0,426	0,404	0,411	0,400	0,321	0,400	0,352	0,376	0,411
Pit. 2,00 - 3,20 mm, %	0,741	0,661	0,657	0,661	0,583	0,545	0,563	0,600	0,600	0,615	0,608	0,678	0,585	0,596	0,627	0,596	0,635
Pit. 3,20 - 7,60 mm, %	0,909	0,727	0,700	0,818	0,900	0,833	0,727	0,846	0,800	0,846	0,800	0,769	0,625	0,750	0,600	0,750	0,727
Kuiva-aine %	0,487	0,498	0,513	0,505	0,407	0,408	0,425	0,425	0,273	0,295	0,299	0,329	0,236	0,246	0,265	0,274	0,291
Rakonopeus	0,62	0,76	0,81	0,85	0,96	1,13	1,22	1,29	1,04	1,22	1,31	1,39	1,30	1,52	1,63	1,75	1,85
Q keskiarvo	0,342	0,307	0,307	0,313	0,279	0,269	0,245	0,284	0,264	0,256	0,268	0,279	0,219	0,245	0,220	0,256	0,264

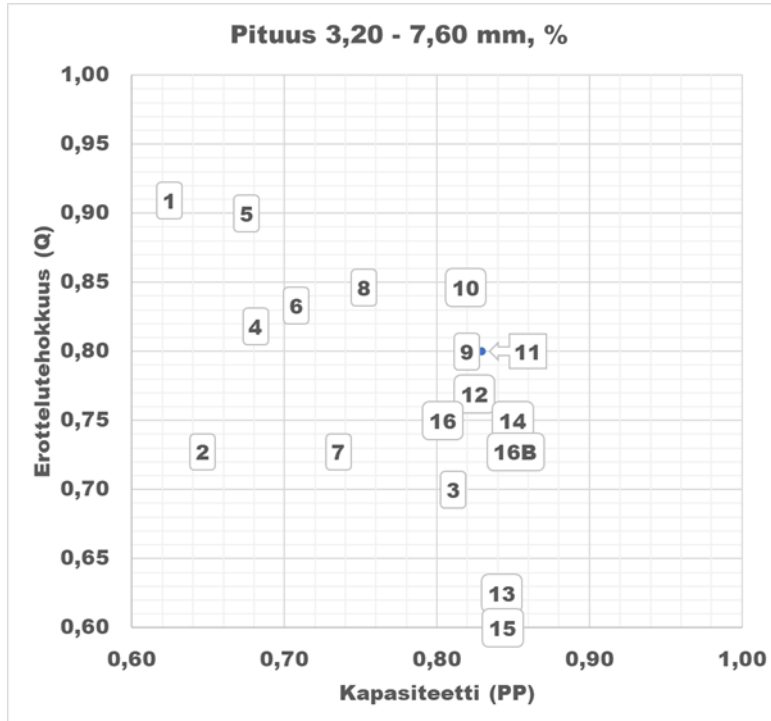
Taulukko 24 havainnollistaa, että massan 2 osalta keskimäärin paras erottelutulos saatiin koepisteessä 32. Tämänkin koepisteen osalta 0,2–0,6 mm:n kokoluokka erottui keskimääräistä huonommin ja koepisteessä kapasiteetti jäi alhaiselle tasolle.

Taulukko 24. Massa 2 koepisteiden Q-indeksivertailu.

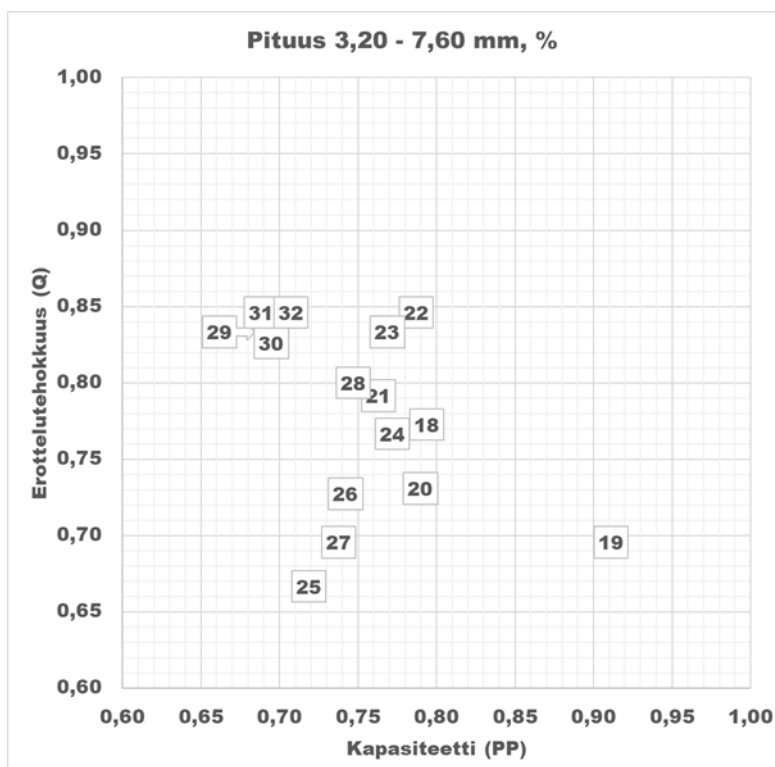
Massa 2	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Lc(l) ISO, mm	0,280	0,279	0,276	0,279	0,319	0,330	0,343	0,334	0,261	0,258	0,263	0,289	0,335	0,333	0,329	0,345
Kuidun leveys, µm	0,018	0,027	0,019	0,024	0,023	0,022	0,027	0,021	0,024	0,021	0,023	0,021	0,025	0,029	0,026	0,023
Kinkki 1/m	0,023	0,022	0,031	0,041	0,033	0,029	0,048	0,034	0,026	0,032	0,026	0,010	0,025	0,032	0,025	0,024
Hienoaine A, %	0,233	0,152	0,179	0,226	0,210	0,226	0,243	0,256	0,229	0,258	0,261	0,279	0,253	0,285	0,296	0,389
Hienoaine B, %	0,180	0,224	0,259	0,144	0,202	0,200	0,236	0,240	0,199	0,233	0,260	0,260	0,072	0,185	0,271	0,213
Pituus < 0.2 mm, %	0,219	0,150	0,178	0,214	0,210	0,211	0,234	0,239	0,227	0,247	0,246	0,256	0,240	0,266	0,282	0,371
Pit. 0.2 - 0,60 mm, %	0,079	0,123	0,103	0,085	0,108	0,115	0,121	0,026	0,009	0,029	0,041	0,046	0,035	0,037	0,044	
Pit. 60 - 1,20 mm, %	0,183	0,120	0,115	0,157	0,182	0,156	0,177	0,165	0,209	0,213	0,223	0,232	0,257	0,265	0,268	0,316
Pit. 1,20 - 2,00 mm, %	0,384	0,378	0,411	0,353	0,476	0,456	0,453	0,472	0,434	0,403	0,442	0,382	0,542	0,473	0,474	0,560
Pit. 2,00 - 3,20 mm, %	0,606	0,606	0,594	0,616	0,677	0,676	0,699	0,695	0,643	0,593	0,578	0,623	0,727	0,731	0,712	0,770
Pit. 3,20 - 7,60 mm, %	0,792	0,773	0,696	0,731	0,792	0,846	0,833	0,767	0,667	0,727	0,696	0,800	0,833	0,826	0,846	0,846
Kuiva-aine %	0,298	0,318	0,207	0,406	0,306	0,319	0,356	0,377	0,397	0,412	0,416	0,431	0,434	0,459	0,479	0,483
Rakonopeus	1,28	1,51	1,63	1,74	1,04	1,19	1,31	1,39	0,96	1,13	1,21	1,29	0,63	0,76	0,81	0,86
Q keskiarvo	0,272	0,259	0,260	0,261	0,294	0,297	0,310	0,304	0,268	0,272	0,277	0,290	0,305	0,314	0,324	0,355

Kuvissa 17 ja 18 tarkastellaan, kuinka eri koepisteiden erottelutehokkuus 3,20–7,60 mm:n kuitufraktion osalta vertautuu kapasiteettiin. Myös tällä tavoin tarkasteltuna massa 1 koepiste 1 erotteli parhaiten, kapasiteetin kustannuk-

sella. Massa 2 koepisteistä kolme kpl (22, 31 ja 32) ylsi yhtä korkeaan erottelulokseen, mutta muut fraktiot huomioituna paremmuusjärjestys koepisteiden välillä muuttuu.



Kuva 19. Massan 1 pitkän kuitufraktion fraktiointi-indeksien sijoittuminen koepisteittäin kapasiteetin ja erottelutehokkuuden suhteen.



Kuva 20. Massan 2 koepisteiden pitkien kuitujen erottelutehokkuus suhteessa kapasiteettiin.

Rejektin sakeutuminen jäi yleisesti vähäiseksi. Optimaalista ($RTF > 2$ -) tasoa ei saavutettu, koska massan kuitukoostumus oli sellainen, että kuituverkkoa ei juurikaan päässyt muodostumaan sihtikorin pinnalle. Osaltaan tähän vaikutti se, ettei lajitinprosessia operoitu tukkeutumispisteen lähetyville saakka.

Syötön paine oli parhaiden koepisteiden kohdalla samalla (0,73 bar) tasolla. Paine-ero sihdin yli oli hieman nollan molemmin puolin, eikä korkeampi paine-ero korreloi hyviin tuloksiin. Päinvastoin selkeästi korkein paine-ero tuotti heikoin erottelutuloksen, joka oli myös kirjallisuuden (Hautala ym. 1999, 258; Ämmälä 2001, 19) perusteella odotettavissa.

Massan hienojakoisuudesta johtuen pienempien kuitujen erottelutehokkuus oli yleisesti alhainen, mutta kuitenkin pitkien kuitujen osalta päästiin hyviin tuloksiin. Molempien massojen kohdalla paras erottelutulos saatiin kapeampirakoisella sihdillä ja noin 10 l/s syöttövirralla. Optimaaliset rejektisuhteet ja sitä kautta akseptin rakonopeudet kuitenkin eriyvät ollen massan 1 osalta 40 % ja 0,62 m/s ja massan 2 osalta 20 % ja 0,86 m/s. Roottorin kehänopeus oli koepisteessä 1 jonkin verran korkeampi kuin koepisteessä 32, mutta nopeuseron vaikutusta ei voida yksilöidä. Ainakaan kehänopeuden nousu ei otaksunnasta huolimatta näyttäisi parantaneen kapasiteettia erottelutehokkuuden kustannuksella, tai nopeusero ei ollut tarpeeksi suuri sen suuntaisten tulosten saamiseksi. Korkeahko kehänopeus kuitenkin mahdollisesti lisäsi akseptin takaisinvirtausta, joka todennäköisesti vaikutti lyhyempien kuitufraktioiden heikkoon erottumiseen. Lämpötilan nousu ei ollut merkittävä, joten sen vaikutusta ei erikseen analysoida.

7.2 Tulosten luotettavuus

Esikokeessa massan takaisinkierätyks syöttöön vaikutti tuloksiin, koska lajittelutapahtumassa kuituihin kohdistuu ulkoisia voimia, jolloin tapahtuu hajoaamista. Myös varsinaisessa lajittelukokeessa käytettävissä olleen massan määrä oli koepisteiden määrään nähden niukka ja massaa jouduttiin kierrättämään takaisin syöttöön. Takaisinkierätyks ei tehty koepisteissä 1–3 ja koepisteissä 4–6 massa kiersi vasta toisen kerran lajitteluprosessin läpi, mutta koepisteestä 7 alkaen tehty massan takaisinkierätyks saattoi vaikuttaa syötettävän massan koostumukseen ja sitä kautta fraktiointiin. Kuitenkin muutokset

syötöstä otettujen näytteiden viskositeetissa ja kuitukoostumuksissa jäivät melko vähäisiksi, ja näin ollen koepisteet ovat riittävän vertailukelpoisia. Tarkempaa tulosta haettaessa olisi toki mahdollista käyttää korjauskerrointa tulosten vertailun apuna. Massan lämpötila kohosi jonkin verran koeajon kuluessa, mutta oletettavasti sekään ei vaikuta merkittävästi tuloksista tehtyihin johtopäätöksiin.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Monet asiat vaikuttavat lajittelun optimointiin, ja sopivimmat parametrit on haettava jokaiselle massatyypille erikseen. Painelajittimeen on mahdollista hakea optimaaliset säädöt myös modifioidun selluloosan ollessa kyseessä. Kirjallisuudesta saadut kaavat ja kaaviomallit havaittiin hyväksi työkaluiksi fraktiointin onnistumista analysoidessa, ja etenkin Excel-taulukkolaskentaohjelman ehdollinen muotoilu -toiminto väriasteikkoineen auttoi havainnollistamaan koepisteiden paremmuutta eri laatuominaisuuksien kohdalla. Fraktiointi on aina kompromissi erottelutehokkuuden ja kapasiteetin välillä, koska kapasiteettia lisäävät muutokset lajitteluparametreissa lisäävät kaikenlaisten kuitujen kulkeutumista sihdin läpi akseptiin tai akseptin takaisinvirtausta rejektin joukkoon. Tässä työssä keskityttiin optimoimaan erottelutehokkuus erityisesti pitkien kuitujen osalta. Työn tavoitteiden tarkkaa määrittämistä hankaloitti hieman se, ettei akseptin toivotulle kuitujakaumalle annettu tässä vaiheessa rajausta. Lajittelussa pyrittiinkin lähinnä selvittämään, kuinka mikäkin yhdistelmä säätöparametrejä vaikuttaa lajittelutuloksiin ja massaan nimenomaan kyseisen massan osalta. Massan keiton, lajittelun ja jälkikäsitteilyn resurssien optimointi on viime kädessä tehtävä yhteistarkasteluna, jotta päästään toivottuihin tuloksiin. Seuraava askel olisi etsiä keinoja, joilla voisi lisätä kapasiteettia erottelutehokkuuden kärsimättä, ja sen jälkeen laadun vakioiminen. Jatkossa fraktiointin kehittämiseksi olisikin entisestään lisättävä yhteistyötä massan valmistusprosessin, lajittelun sekä jatkojalostusyksiköiden välillä. Nyt käytössä olleiden, samalla muotoilulla mutta eri rakoleveydellä varustettujen sihtien lisäksi voisi seuraavaksi tutkia sileiden reikäsihtien sekä vieläkin kapeampirakoisen sihdin vaikutusta fraktiointitulokseen verrattuna hieman suurempaan rakokokoon, mahdollisesti yhdistettynä pienempiin roottorin kehänopeuksiin.

LÄHTEET

Alén, R. 2000. Structure and chemical composition of wood. Teoksessa Stenius, P. Papermaking science and technology: book 3, Forest products chemistry. Helsinki: Fapet, 12–57.

Andritz. 2021. Moduscreen coarse screening. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/paper-production/stock-preparation/moduscreen-coarse-screening> [viitattu 23.7.2021].

Asikainen, S. 2015. Applicability of fractionation of softwood and hardwood kraft pulp and utilisation of the fractions. Väitöskirja. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/science/2015/S73.pdf> [viitattu 31.7.2021].

Bajpai, P. 2018. Biermann's Handbook of Pulp and Paper: Volume 1, Raw material and pulp making. 3. painos. Elsevier. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128142400/biermanns-handbook-of-pulp-and-paper#book-info> [viitattu 29.7.2021]

Berg, P. & Lingqvist, O. 2017. Pulp, paper and packaging in the next decade: Transformational change. WWW-dokumentti. Päivitetty 7.8.2019. Saatavissa: <https://www.mckinsey.com/industries/paper-forest-products-and-packaging/our-insights/pulp-paper-and-packaging-in-the-next-decade-transformational-change> [viitattu 24.7.2021].

Bergström, J. 2006. Flow field and fibre fractionation studies in hydrocyclones. Väitöskirja. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:11075/FULLTEXT01.pdf> [viitattu 31.7.2021].

Biotalous. 2014. Suomen biotalousstrategia. https://www.biotalous.fi/wp-content/uploads/2015/01/Suomen_biotalousstrategia_2014.pdf [viitattu 26.7.2021].

El-Sharkawy, K., Koskenhely, K. & Paulapuro, H. 2008. Tailoring softwood kraft pulp properties by fractionation and refining. *Tappi Journal* 11, 15–22. Verkkolehti. Saatavissa: <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/08/NOV/08NOV15.aspx> [viitattu 5.8.2021].

Engstrand, P. & Johansson, B. 2009. Paper recycling. Teoksessa Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G. Pulp and paper chemistry and technology: Volume 2, Pulping Chemistry and Technology. Berlin, New York: De Gruyter.

Fahlén, J. 2005. The cell wall ultrastructure of wood fibres – effects of the chemical pulp fibre line. Väitöskirja. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:7109/FULLTEXT01.pdf> [viitattu 31.7.2021].

FAO. 2021. FAOSTAT. Digitaalinen tietokanta. Saatavissa: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> [viitattu 24.7.2021].

Forestbiofacts. 2021a. General approach and principles. Digitaalinen oppimisympäristö. Päivitetty 5.5.2021. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/> [viitattu 30.7.2021].

Forestbiofacts. 2021b. Pulp characterisation and properties. Digitaalinen oppimisympäristö. Päivitetty 6.5.2021. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/> [viitattu 29.7.2021].

Forestbiofacts. 2021c. Kraft pulping. Digitaalinen oppimisympäristö. Päivitetty 6.5.2021. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/> [viitattu 29.7.2021].

Forestbiofacts. 2021d. Screening. Digitaalinen oppimisympäristö. Päivitetty 11.5.2021. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/> [viitattu 24.7.2021].

Forestbiofacts. 2021e. Chemical pulps. Digitaalinen oppimisympäristö. Päivitetty 25.5.2021. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/> [viitattu 30.7.2021].

Hamelin, M., Jokerinne, E. & Gooding, R. 2014. Fundamental advances in pulp screening technology. Konferenssijulkaisu. Pdf-dokumentti. Saatavissa: https://www.gzs.si/Portals/183/vsebine/dokumenti/2014/17_Fundamental_Advances_In_Pulp_Screening_Technology-R.Gooding_Aikawa_Ft.pdf [viitattu 22.8.2021].

Hautala, J., Hourula, I., Jussila, T. & Pitkänen, M. 1999. Screening and cleaning. Teoksessa Sundholm, J. Papermaking science and technology: book 6, Mechanical pulping. Helsinki: Fapet, 250–287.

Hautala, J., Niinimäki, J., Jokinen, H., Leppinen, J., Pitkänen, M. & Ämmälä, A. 2009. Screening and cleaning. Teoksessa Lönnberg, B. Papermaking science and technology: book 5, Mechanical pulping. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association: Paperi ja puu, 284–326.

Hu, G., Fu, S. & Liu, H. 2013. Hemicellulose in pulp affects paper properties and printability. *Appita Journal* 2, 139–144. Verkkolehti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/279659616_Hemicellulose_in_pulp_affects_paper_properties_and_printability [viitattu 29.7.2021].

Höglund, H. 2009. Mechanical pulping. Teoksessa Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G. Pulp and paper chemistry and technology: Volume 2, Pulping Chemistry and Technology. Berlin, New York: De Gruyter.

Jokinen, H. 2007. Screening and cleaning of pulp – a study to the parameters affecting separation. Väitöskirja. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://herkules oulu.fi/isbn9789514284526> [viitattu 31.7.2021].

Järvinen, J. 2021. Paperikoneita saatetaan sulkea lisää – paperin menekki hiipuu yhä ja sellun läpimurtoa uusiin tuotteisiin odotetaan kuumeisesti. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-11688818> [viitattu 26.7.2021].

Karjalainen, M. 2015. Studies on wheat straw pulp fractionation. Väitöskirja. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://jultika oulu.fi/files/isbn9789526210063.pdf> [viitattu 20.8.2021].

Knowpap. 2021a. Puun rakenne. Digitaalinen oppimisympäristö. Päivitetty 27.7.2021. Saatavissa: <http://www.knowpap.com> [viitattu 27.7.2021].

Knowpap. 2021b. Lajittelun teoria ja perusmekanismit. Digitaalinen oppimisympäristö. Päivitetty 24.7.2021. Saatavissa: <http://www.knowpap.com> [viitattu 24.7.2021].

Krotscheck, A.W. 2006. Pulp screening, cleaning, and fractionation. Teoksessa Sixta, H. Handbook of pulp, volume 1. Weinheim: Wiley-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA, 561–608.

Labafzadeh, S.R. 2015. Cellulose-based materials. Väitöskirja. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-51-0848-7> [viitattu 26.7.2021].

Larsson, P., Riazanova, A., Cinar Ciftci, G., Rojas, R., Øvrebø, H., Wågberg, L. & Berglund, L. 2019. Towards optimised size distribution in commercial microfibrillated cellulose: a fractionation approach. *Cellulose* 26, 1565–1575. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-018-2214-4> [viitattu 30.7.2021].

Madani, A., Kiiskinen, H., Olson, J. & Martinez, D. 2011. Paper physics: Fractionation of microfibrillated cellulose and its effects on tensile index and elongation of paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 3, 306–311. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.3183/NPPRJ-2011-26-03-p306-311> [viitattu 31.7.2021].

Metsäteollisuus. Sellu – uusiutuva innovaatioiden sampo. 2019. Pdf-dokumentti. Saatavissa: https://global-uploads.webflow.com/5f44f62ce4d302179b465b3a/5faea0776d83343884464487_Sellu_Uusiutuvainnovaatioidensampo.pdf [viitattu 24.7.2021].

Olson, J.A. 2001. Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening, Slotted Screen Plates. *Journal of pulp and paper science* 8, 255–261. Pdf-dokumentti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/237549347_Fibre_Length_Fractionation_Caused_by_Pulp_Screening_Slotted_Screen_Plates [viitattu 25.7.2021].

Olson, J.A. 2003. A lecture on pressure screening. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://www.fibrelab.ubc.ca/files/2013/01/Topic-5-Mechanical-Pulping-Screening-text.pdf> [viitattu 25.7.2021].

Potgier, M., Pauck, W.J., Johakimu, J. & Sithole, B.B. 2021. Using hydrocyclone fractionation to improve chemical pulp quality. *South African journal of chemical engineering* 36, 74-79. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1026918521000032> [viitattu 2.7.2021].

Saint Amand, F.J. 2001. Stock preparation part 2 – particle separation processes. Teoksessa Baker, C. F. The science of papermaking: Transactions of the 12th fundamental research symposium held at Oxford: September 2001, 81-191. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2020/03/2001.1.81.pdf> [viitattu 19.8.2021].

Seppälä, M.J., Klemetti, U., Kortelainen, V.-A., Lyytikäinen, J., Siitonen, H. & Sironen, R. 2005. Paperimassan valmistus. Helsinki: Opetushallitus.

Shojaeiarani, J., Bajwa, D. & Shirzadifar, A. 2019. A review on cellulose nanocrystals as promising biocompounds for the synthesis of nanocomposite hydrogels. *Carbohydrate polymers* 216, 247–259. Verkkojulkaisu. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861719304175> [viitattu 26.7.2021].

- Sloane, M., Kibblewhite, P., Riddell, M. & Williams, S. 2006. The pressure screen – a tool for the modern fibre alchemist. *Appita annual conference & exhibition 2006*, 65–73. Pdf-dokumentti. Saatavissa: http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/03_kibblewhite.pdf [viitattu 20.8.2001].
- Suomen Metsäyhdistys. 2021. Metsäbiotalouden tulevaisuuskuvasto. WWW-dokumenttikokoelma. Saatavissa: <https://forest.fi/fi/metsabiotalouden-tulevaisuuskuvasto/> [viitattu 24.7.2021].
- Tervola, P., Andersson, R., Danielsson, M., Engelfeldt, A., Kiero, S., Olsson, K., Pikka, O., Samuelsson, A. & Siik, S. 2011. Washing, screening and cleaning of pulp. Teoksessa Suomen paperi-insinöörien yhdistys & Fardim, P. Papermaking science and technology: Book 6, Chemical pulping. Part 1, Fibre chemistry and technology. 2nd edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association: Paperi ja puu.
- Trivedi, P. 2019. Supramolecular design of cellulose-based hydrogel beads. Väitöskirja. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-12-3790-4> [viitattu 26.7.2021].
- Tulli. 2021. ULJAS – Tavaroiden ulkomaankauppatilastot. Digitaalinen tietokanta. Saatavissa: <https://uljas.tulli.fi/v3rti/db/0> [viitattu 24.7.2021].
- Valmet. 2021. Screening pulp the intelligent way. WWW-dokumentti. Päivitystietoa ei saatavilla. Saatavissa: <https://www.valmet.com/pulp/cooking-and-fiberline/knotting-and-screening/?page=1> [viitattu 23.7.2021].
- Vander Wielen, L.C. 2004. Dielectric barrier discharge-initiated fiber modification. Väitöskirja. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/1853/7091> [viitattu 27.7.2021].
- Viitanen, J. & Kniivilä, M. 2020. Metsäteollisuus vedenjakajalla – mitä paperin ja sellun jälkeen? Blogi. Saatavissa: <https://www.luke.fi/blogi/metsateollisuus-vedenjakajalla-mita-paperin-ja-sellun-jalkeen/> [viitattu 24.7.2021].
- Viitanen, J., Mutanen, A. & Karvinen, S. 2020. Metsäsektorin suhdannekatsaus 2020–2021. Verkkojulkaisu. Saatavissa: https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/546322/luke-luobio_71_2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y [viitattu 24.7.2021].
- Vuori, S. 2016. Erialaisten selluloosamateriaalien nitraus ja karakterisointi. Pro gradu -tutkielma. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:juy-201612135054> [viitattu 29.7.2021].
- Wakelin, R.F. & Corson, S.R. 1995. TMP long fibre fractionation with pressure screens. Konferenssijulkaisu. Pdf-dokumentti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/328512441_TMP_long_fibre_fractionation_with_pressure_screens [viitattu 25.7.2021].
- Willför, S., Alén, R., van Dam, J., Liu, Z. & Tähtinen, M. 2011. Raw materials. Teoksessa Fardim, P. Papermaking science and technology: book 6, Chemical pulping part 1, Fibre chemistry and technology. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association: Paperi ja puu, 16–186.

Ämmälä, A. 2001. Fractionation of thermomechanical pulp in pressure screening. Väitöskirja. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/urn:isbn:951425919X> [viitattu 23.7.2021].

Ämmälä, A., Niinimäki, J., Illikainen, M. & Jokinen, H. 2015. Role of foil pulsation in the capacity of a machine screen. *Nordic pulp & paper research journal* 2, 220–224. Verkkolehti. Saatavissa: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3183/npprj-2015-30-02-p220-224/html> [viitattu 22.8.2021].

KUVALUETTELO

Kuva 121. Erilaisia puusoluja mittakaavassa. Sundqvist, H. 2007. Puusolut ja solukot. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://puukemia.tkk.fi/opinnot/kurs-sit/19-1000/luennot/Puun%20rakenne%20ja%20solut_%20v3.pdf [viitattu 22.9.2021].

Kuva 2. Selluloosapolymeerien hydroksyyliiryhmät muodostavat vahvoja vetysidoksia ketjun sisällä ja molekyyliketjujen välille. Siljander, S. & Björkqvist, T. 2019. Selluloosa-nanomateriaalit. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.bioaly.fi/wp-content/uploads/2019/05/Bio%C3%84ly-seminaari-25042019.pdf> [viitattu 22.9.2021].

Kuva 3. Mikroskooppikuvassa on havaittavissa käsitellyn sellun sisältämiä erikokoisia kuituja ja hienoainesta. Ropponen, T. 9.7.2021.

Kuva 4. Este- ja todennäköisyyslajittuminen (Olson 2003, 7).

Kuva 5. Huopautuminen ja orientaatio (Olson 2003, 7).

Kuva 6. Lajittimen toimintaa kuvaava piirros. F= syöttö, A= aksepti ja R= rejekti. Asendrych, D., Favre-Marinet, M., Julien Saint Amand, F. & Wojciechowski, G. 2008. Numerical Studies on the Extrusion of Visco-elastic Particles through Slots in the Screening Process. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-the-pressure-screen-a-and-pressure-variations-at-the-screen-plate-b_fig1_242646511 [viitattu 23.7.2021].

Kuva 7. Esimerkki profiloidusta reikäsihdistä. Ropponen, T. 19.5.2021.

Kuva 22. Kuitujen ajautuminen työstetyn ja kiilalankamallisen profiloidun sihtirummun läpi turbulenttisen virtauksen ajamana (Saint Amand 2001, 92).

Kuva 9. Lankarakosihdin poikkileikkaus (Ämmälä 2001, 19). W= langan leveys, S= rakoleveys, P= profiilin korkeus.

Kuva 10. Lankarakosihti 0,20 mm raolla, langan leveys 4 mm ja profiilin korkeus 0,60 mm. Ropponen, T. 25.5.2021.

Kuva 11. Kuvan 8 sihti ulkopuolelta kuvattuna, lankojen kiilamaisuus erottuu. Ropponen, T. 25.5.2021.

Kuva 12. Roottorityyppejä; vasemmalta umpinainen, avoin ja puoliavoin roottori (Krotscheck 2006, 564).

Kuva 13. Roottorin muuttujat. P-=imupuoli, P+= painepuoli, Vw= foilin kulma, s= foilin välys, Vu= kehänopeus, Fl= foilin pituus ja Fb= foilin paksuus (Hautala ym. 2009, 301).

Kuva 14. Roottorimallien poikkileikkaukset; vasemmalla kupla-, keskellä pykälä- ja oikealla foiliroottori (Krotscheck 2006, 564).

Kuva 15. Andritz Moduscreen F-lajitin (Hautala ym. 1999, 268).

Kuva 16. Esimerkkikuva kuplaroottorista. 2018. Rotor – bump type – bird 400. Cascades. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://csplus.cascades.com/rotor-bump-type-bird-400.html> [viitattu 22.8.2021].

Kuva 17. Lajitteluprosessin käyttöliittymä. Ropponen, T. 26.5.2021.

Kuva 18. Fraktiointinäytteitä mikroskooppitarkastelussa. Ropponen, T. 9.7.2021.

Kuva 19. Massan 1 pitkän kuitufraktion fraktiointi-indeksien sijoittuminen koepisteittäin kapasiteetin ja erottelutehokkuuden suhteen. Ropponen, T. 30.8.2021.

Kuva 20. Massan 2 koepisteiden pitkien kuitujen erottelutehokkuus suhteessa kapasiteettiin. Ropponen, T. 30.8.2021.

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Suomen sellutuotanto 2019. Ropponen, T. FAO 2021.

Taulukko 2. Yleisimpien puusolujen ominaisuuksia. Alén, R. 2000, 18. Structure and chemical composition of wood. Teoksessa Stenius, P. Papermaking science and technology: book 3, Forest products chemistry. Helsinki: Fapet, 12–57.

Taulukko 3. Lajittimen tavoiteparametrit. Ropponen, T. 24.5.2021.

Taulukko 4. Roottorin ajoparametrit. Ropponen, T. 24.5.2021.

Taulukot 5.–8. Koesuunnitelma, vaiheet 1–4. Ropponen, T. 28.6.2021.

Taulukko 9. Lajitinprosessin mittalaitteet. Ropponen, T. 16.7.2021.

Taulukko 10. Työssä käytetyt kuituanalyysisuuret selityksineen. Valmet fiber image analyzer – Valmet FS5, Asennus-, operointi- ja ylläpito-ohje, K12690 V1.4 FI. Valmet Automation 2017, 33–34.

Taulukko 11. Esikokeen toteutuneet parametrit koepisteittäin. Ropponen, T. 3.6.2021.

Taulukko 12. Esikokeen rakonopeudet sihdin läpi. Ropponen, T. 3.6.2021.

Taulukko 13. Roottorin kierrosluvut ja kehänopeudet esikokeessa. Ropponen, T. 3.6.2021.

Taulukko 14. Esikokeen syöttönäytteiden analyysitulokset. Ropponen, T. 1.6.2021.

Taulukko 15. Esikokeen vaihe 1 näytteiden analyysitulokset. Ropponen, T. 1.6.2021.

Taulukko 16. Esikokeen 2. vaiheen näytteiden analyysitulokset. Ropponen, T. 1.6.2021.

Taulukko 17. Esikokeen 3. vaiheen analyysitulokset. Ropponen, T. 1.6.2021.

Taulukko 18. Lajittelukokeen toteutuneet parametrit. Ropponen, T. 20.7.2021.

Taulukko 19. Lajittelukokeen toteutuneet rakonopeudet. Ropponen, T. 20.7.2021.

Taulukko 20. Lajittelukokeen syöttönäytteiden analyysitulokset. Ropponen, T. 19.7.2021.

Taulukko 21. Massa 1 tuloksista johdetut vertailuluvut. Ropponen, T. 20.7.2021.

Taulukko 22. Massa 2 tuloksista johdetut vertailuluvut. Ropponen, T. 20.7.2021.

Taulukko 23. Massa 1 koepisteiden Q-indeksivertailu. Ropponen, T. 20.8.2021.

Taulukko 24. Massa 2 koepisteiden Q-indeksivertailu. Ropponen, T.
20.8.2021.

Taulukot 25.–28. Vaiheiden 1–4 aksepti- ja rejektinäytteiden kuituanalyysitulokset. Ropponen, T. 21.8.2021.

Taulukko 25. Vaiheen 1 aksepti- ja rejektinäytteiden kuituanalyysitulokset.

Näyte	A1	R1u	A2	R2	A3	R3	A4	R4
Lc(n) ISO,mm	0,442	0,54	0,454	0,541	0,458	0,557	0,451	0,548
Lc(l) ISO, mm	0,656	0,92	0,698	0,917	0,712	0,943	0,695	0,927
Lc(w) ISO, mm	1,028	1,515	1,131	1,501	1,165	1,528	1,132	1,51
Kuidun leveys, µm	28,38	29,29	28,44	29,08	28,54	29,24	28,51	29,19
Kiharusus, %	6,41	7,25	6,6	7,3	6,55	7,34	6,49	7,22
Kinkki 1/m	3801	3716	3760	3662	3750	3688	3706	3697
Hienoaine A, %	45,46	33,02	43,77	29,62	42,83	28,22	43,55	29,89
Hienoaine B, %	1,27	0,75	1,26	0,84	1,21	0,85	1,22	0,86
Hienoaine %	84,29	81,26	83,75	77,27	83,2	76,84	83,38	78,34
Fibrillaatio, %	1,25	0,87	1,17	0,77	1,13	0,77	1,12	0,82
Pituus < 0.2 mm, %	42,6	30,4	41,1	28	39,9	26,8	40,7	27,9
Pituus 0.2–0,60 mm, %	34,9	32,1	34,4	32,9	34,7	32,2	34,9	32,5
Pituus 60–1,20 mm, %	15,6	19,4	15,8	20,5	16,2	21,2	15,8	20,7
Pituus 1,20–2,00 mm, %	5,4	11,3	6,4	11,7	6,6	12,2	6,2	11,5
Pituus 2,00–3,20 mm, %	1,5	5,8	2	5,9	2,3	6,7	2,1	6,2
Pituus 3,20–7,60 mm, %	0,1	1,1	0,3	1,1	0,3	1	0,2	1,1
Kuiva-aine %	1,35	2,63	1,43	2,85	1,57	3,22	1,43	2,89
Näyte	A5	R5	A6	R6	A7	R7	A8	R8
Lc(n) ISO,mm	0,451	0,525	0,462	0,537	0,452	0,522	0,452	0,532
Lc(l) ISO, mm	0,689	0,88	0,721	0,918	0,697	0,876	0,705	0,917
Lc(w) ISO, mm	1,103	1,456	1,174	1,534	1,146	1,459	1,158	1,561
Kuidun leveys, µm	28,4	29	28,55	29,22	28,54	29,05	28,54	29,13
Kiharusus, %	6,47	7,14	6,73	7,38	6,35	7,17	6,41	7,2
Kinkki 1/m	3746	3705	3768	3750	3677	3680	3670	3648
Hienoaine A, %	45,5	35,09	43,75	35,25	44,02	35,33	45,66	34,22
Hienoaine B, %	1,23	0,94	1,21	0,8	1,2	0,96	1,16	0,8
Hienoaine %	84,22	81,98	83,6	83,26	83,59	83,25	84,75	82,92
Fibrillaatio, %	1,23	0,94	1,22	0,92	1,19	0,88	1,27	0,88
Pituus < 0.2 mm, %	41,8	32,2	40,3	32,3	40,9	33,1	41,6	32,1
Pituus 0.2–0,60 mm, %	34,3	32,5	34,1	31,3	34,7	32,5	34,4	32,1
Pituus 60–1,20 mm, %	15,6	19,1	16,2	19,1	15,9	18,8	15,1	18,8
Pituus 1,20–2,00 mm, %	6,2	10,4	6,7	10,6	6,1	9,8	6,4	10,2
Pituus 2,00–3,20 mm, %	2	4,8	2,5	5,5	2,1	4,8	2,2	5,5
Pituus 3,20–7,60 mm, %	0,1	1	0,2	1,2	0,3	1,1	0,2	1,3
Kuiva-aine %	1,37	2,31	1,42	2,4	1,46	2,54	1,5	2,61

Taulukko 26. Vaiheen 2 kuituanalyysitulokset.

Näyte	A9	R9	A10	R10	A11	R11	A12	R12
Lc(n) ISO,mm	0,441	0,515	0,442	0,523	0,443	0,519	0,446	0,53
Lc(l) ISO, mm	0,669	0,872	0,675	0,909	0,674	0,884	0,686	0,92
Lc(w) ISO, mm	1,095	1,47	1,11	1,554	1,095	1,487	1,14	1,56
Kuidun leveys, µm	28,54	28,98	28,53	28,98	28,53	28,99	28,55	29,18
Kiharusus, %	6,28	6,83	6,31	6,97	6,32	6,83	6,33	7,08
Kinkki 1/m	3641	3610	3642	3586	3645	3574	3666	3599
Hienoaine A, %	44,59	35,31	43,61	39,27	42,86	35,08	43,92	34,42
Hienoaine B, %	1,14	0,96	1,19	0,95	1,15	0,9	1,17	0,91
Hienoaine %	83,49	80,47	82,98	85,66	82,7	81,04	83,31	81,47
Fibrillaatio, %	1,21	0,94	1,18	0,89	1,08	0,89	1,19	0,87
Pituus < 0.2 mm, %	41,1	33	40,7	36,5	40,5	32,7	40,6	32,2
Pituus 0.2–0,60 mm, %	36	33	36,2	30,7	36,1	32,6	35,8	31,9
Pituus 60–1,20 mm, %	15,3	18,6	15,3	17	15,5	18,6	15,4	18,7
Pituus 1,20–2,00 mm, %	5,4	9,4	5,6	9,4	5,9	10,01	6	10
Pituus 2,00–3,20 mm, %	2	5	2	5,2	2	5,1	1,9	5,9
Pituus 3,20–7,60 mm, %	0,2	1	0,2	1,3	0,2	1	0,3	1,3
Kuiva-aine %	1,52	2,09	1,55	2,2	1,57	2,24	1,57	2,34

Näyte	A13	R13	A14	R14	A15	R15	A16	R16	A16B	R16B
Lc(n) ISO,mm	0,435	0,497	0,439	0,506	0,442	0,508	0,441	0,518	0,438	0,518
Lc(l) ISO, mm	0,659	0,83	0,67	0,867	0,676	0,877	0,684	0,898	0,671	0,886
Lc(w) ISO, mm	1,089	1,422	1,112	1,501	1,125	1,516	1,153	1,546	1,116	1,503
Kuidun leveys, µm	28,55	28,94	28,53	29,06	28,63	29	28,53	29,15	28,57	29,15
Kiharusus, %	6,13	6,67	6,17	6,73	6,15	6,82	6,2	6,9	6,09	6,91
Kinkki 1/m	3620	3560	3593	3532	3599	3530	3582	3541	3554	3539
Hienoaine A, %	43,69	40,67	42,97	37,91	43,07	38,93	43,55	37,36	43,28	35,8
Hienoaine B, %	1,21	0,95	1,2	0,92	1,12	0,89	1,2	0,90	1,17	0,87
Hienoaine %	82,93	85,03	82,7	82,69	82,8	84,24	82,98	83,46	82,67	81,86
Fibrillaatio, %	1,13	1,03	1,07	1	1,13	0,94	1,13	0,92	1,13	0,94
Pituus < 0.2 mm, %	41,3	37,5	40,8	35,1	40,5	36,3	40,7	34,8	40,5	33,4
Pituus 0.2–0,60 mm, %	36,6	32,4	36,2	32,9	36,1	32,2	36,3	31,9	36,5	32,7
Pituus 60–1,20 mm, %	14,6	17,2	15,4	17,2	15,5	16,6	14,8	17,6	15,2	18,1
Pituus 1,20–2,00 mm, %	5,5	8,1	5,4	9	5,7	8,8	5,8	9,3	5,6	9,5
Pituus 2,00–3,20 mm, %	1,7	4,1	1,9	4,7	1,9	5,1	2,1	5,2	1,9	5,2
Pituus 3,20–7,60 mm, %	0,3	0,8	0,3	1,2	0,4	1	0,3	1,2	0,3	1,1
Kuiva-aine %	1,55	2,03	1,59	2,11	1,61	2,19	1,62	2,23	1,63	2,3

Taulukko 27. Vaihe 3 analyysitulokset.

Näyte	A17	R17	A18	R18	A19	R19	A20	R20
Lc(n) ISO,mm	0,438	0,521	0,438	0,522	0,441	0,525	0,441	0,528
Lc(l) ISO, mm	0,702	0,975	0,699	0,97	0,714	0,986	0,721	1
Lc(w) ISO, mm	1,251	1,776	1,244	1,756	1,296	1,783	1,317	1,827
Kuidun leveys, µm	28,6	29,13	28,69	29,49	28,77	29,34	28,74	29,44
Kiharusus, %	6,21	7,07	6,24	7,17	6,31	7,05	6,2	6,83
Kinkki 1/m	3512	3430	3564	3487	3563	3455	3497	3353
Hienoaine A, %	46,19	35,44	44,78	37,97	44,6	36,63	45,47	35,19
Hienoaine B, %	1,33	1,09	1,25	0,97	1,35	1	1,25	1,07
Hienoaine %	84,36	80,93	83,53	84,06	83,51	82,64	84,17	81,46
Fibrillaatio, %	1,21	0,87	1,15	0,98	1,16	0,94	1,19	0,88
Pituus < 0.2 mm, %	42,9	33,5	42,1	35,8	41,6	34,2	42,5	33,4
Pituus 0.2–0,60 mm, %	35,3	32,5	35,8	31,4	35,8	32,1	35,3	32,3
Pituus 60–1,20 mm, %	13,4	16,4	13,9	15,8	13,8	15,6	13,4	15,9
Pituus 1,20–2,00 mm, %	5,3	8,6	5,1	8,2	5,3	9	5,5	8,5
Pituus 2,00–3,20 mm, %	2,6	6,6	2,6	6,6	2,8	6,9	2,8	7,3
Pituus 3,20–7,60 mm, %	0,5	2,4	0,5	2,2	0,7	2,3	0,7	2,6
Kuiva-aine %	1,6	2,28	1,61	2,36	1,65	2,08	1,52	2,56
Näyte	A21	R21	A22	R22	A23	R23	A24	R24
Lc(n) ISO,mm	0,422	0,516	0,427	0,526	0,429	0,533	0,433	0,541
Lc(l) ISO, mm	0,663	0,973	0,671	1,002	0,68	1,035	0,701	1,053
Lc(w) ISO, mm	1,186	1,789	1,175	1,824	1,233	1,914	1,297	1,909
Kuidun leveys, µm	28,57	29,25	28,63	29,28	28,66	29,47	28,79	29,41
Kiharusus, %	5,98	6,93	5,99	7,01	6,09	7,06	5,94	6,96
Kinkki 1/m	3487	3371	3471	3369	3511	3342	3447	3328
Hienoaine A, %	47,36	37,41	47,64	36,88	47,25	35,77	46,65	34,72
Hienoaine B, %	1,29	1,03	1,25	1	1,23	0,94	1,29	0,98
Hienoaine %	84,39	82,48	84,77	83,07	84,66	82,48	84,5	82,08
Fibrillaatio, %	1,23	0,93	1,23	0,92	1,24	0,88	1,2	0,85
Pituus < 0.2 mm, %	44,3	35	44,1	34,8	44	33,7	43,5	33,1
Pituus 0.2–0,60 mm, %	36,1	32,2	35,5	31,4	35,6	31,5	35,4	31,1
Pituus 60–1,20 mm, %	12,6	15,4	13	15,4	13	15,8	13,2	15,8
Pituus 1,20–2,00 mm, %	4,4	8,4	4,9	9	4,7	8,6	4,7	8,9
Pituus 2,00–3,20 mm, %	2,1	6,5	2,2	6,8	2,2	7,3	2,5	8,2
Pituus 3,20–7,60 mm, %	0,5	2,4	0,4	2,6	0,5	3	0,7	3
Kuiva-aine %	1,59	2,29	1,62	2,38	1,63	2,53	1,65	2,65

Taulukko 28. Vaihe 4 analyysitulokset.

Näyte	A25	R25	A26	R26	A27	R27	A28	R28
Lc(n) ISO,mm	0,42	0,492	0,426	0,5	0,425	0,505	0,429	0,514
Lc(l) ISO, mm	0,663	0,897	0,686	0,925	0,697	0,946	0,704	0,99
Lc(w) ISO, mm	1,207	1,675	1,258	1,73	1,309	1,778	1,311	1,873
Kuidun leveys, µm	28,56	29,26	28,65	29,26	28,68	29,35	28,78	29,4
Kiharuus, %	5,9	6,67	5,97	6,62	5,95	6,69	6,05	6,9
Kinkki 1/m	3467	3375	3457	3345	3434	3345	3427	3392
Hienoaine A, %	48,65	37,52	48,95	36,3	48,09	35,56	49,45	35,66
Hienoaine B, %	1,36	1,09	1,33	1,02	1,31	0,97	1,31	0,97
Hienoaine %	85,08	81,85	85,44	81,09	84,88	81,03	85,92	81,82
Fibrillaatio, %	1,19	0,93	1,26	0,86	1,22	0,88	1,32	0,87
Pituus < 0.2 mm, %	45,9	35,5	45,8	34,5	45,1	34	45,7	34
Pituus 0.2–0,60 mm, %	35,1	34,2	34,5	34,2	35	34	34,4	33
Pituus 60–1,20 mm, %	12,1	15,3	12,2	15,5	12,2	15,7	11,9	15,5
Pituus 1,20–2,00 mm, %	4,3	7,6	4,6	7,7	4,3	7,7	4,7	7,6
Pituus 2,00–3,20 mm, %	2	5,6	2,4	5,9	2,7	6,4	2,6	6,9
Pituus 3,20–7,60 mm, %	0,6	1,8	0,6	2,2	0,7	2,3	0,6	3
Kuiva-aine %	1,46	2,42	1,51	2,57	1,57	2,69	1,6	2,81
Näyte	A29	R29u	A30	R30	A31	R31	A32	R32
Lc(n) ISO,mm	0,402	0,491	0,41	0,505	0,412	0,506	0,414	0,516
Lc(l) ISO, mm	0,611	0,919	0,642	0,962	0,642	0,957	0,648	0,99
Lc(w) ISO, mm	1,099	1,748	1,168	1,818	1,159	1,794	1,175	1,844
Kuidun leveys, µm	28,56	29,3	28,54	29,38	28,55	29,32	28,72	29,4
Kiharuus, %	5,66	6,53	5,82	6,73	5,73	6,69	5,83	6,84
Kinkki 1/m	3417	3333	3444	3334	3428	3341	3400	3319
Hienoaine A, %	52,99	39,59	52,68	37,67	50,59	35,6	54,71	33,42
Hienoaine B, %	1,25	1,16	1,3	1,06	1,33	0,97	1,27	1
Hienoaine %	86,59	84,15	86,97	83,39	85,71	81,5	89,25	79,38
Fibrillaatio, %	1,43	0,95	1,34	0,82	1,33	0,83	1,46	0,78
Pituus < 0.2 mm, %	49,5	37,6	48,9	35,9	47,2	33,9	51	32,1
Pituus 0.2–0,60 mm, %	34,7	33,1	34,2	33	35,2	33,9	32,5	34
Pituus 60–1,20 mm, %	10,7	14,4	10,8	14,7	11,2	15,3	10,6	15,5
Pituus 1,20–2,00 mm, %	3,3	7,2	3,9	7,4	4,1	7,8	3,7	8,4
Pituus 2,00–3,20 mm, %	1,5	5,5	1,8	6,7	1,9	6,6	1,7	7,4
Pituus 3,20–7,60 mm, %	0,4	2,4	0,4	2,3	0,4	2,6	0,4	2,6
Kuiva-aine %	1,41	2,49	1,46	2,7	1,5	2,88	1,55	3