



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**YHDYSKUNTAJÄTTEEN SISÄLTÄMÄN PAPERI-
JA PAHVIKUITUJAKEEN
HYÖDYNTÄMISPOTENTIAALI**

Jonna Ojala

Diplomityö
Kansainvälinen vihreän kemian ja biotuotannon koulutusohjelma
Elokuu 2014

Koulutusohjelma Kansainvälinen vihreän kemian ja biotuotannon koulutusohjelma		Työn tarkastaja Körkkö, M. TkT	
Tekijä Ojala, Jonna Marika		Työn ohjaajat Körkkö, M. TkT Ämmälä, A. TkT Soini, J. TkT	
Työn nimi Yhdyskuntajätteen sisältämän paperi- ja pahvikuitujakeen hyödyntämispotentiaali			
Opintosuunta Ympäristötekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Elokuu 2014	Sivumäärä 104
<p>Tiivistelmä</p> <p>Suomessa syntyvän yhdyskuntajätteen määrä kasvoi vuoden 2012 tilastoissa 2,7 miljoonaan tonniin, mistä noin kolmannes ohjautui energiakäyttöön ja kolmannes hyödynnettiin materiaalina. Kaatopaikoille loppusijoitettavaksi päätyi silti yli 900 000 tonnia lajittelematonta sekajätettä, joka sisältää arviolta puolet orgaanista jätettä ja biohajoavaa materiaalia. Uusi, 1.1.2016 voimaantuleva jätedirektiivi kieltää kaiken orgaanisen jätteen läjityksen kaatopaikoille. Uuden asetuksen myötä sekajätteen eri jakeiden hyötykäytön toivotaan tehostuvan ja kaatopaikkauksen vähenevän 20 prosenttiin. Jätteistä jalostuvat uudet tuotteet vähentävät ympäristövaikutuksia ja säästävät luonnonvaroja, minkä vuoksi jäte on opittava näkemään resurssina ja sen hyötykäyttömahdollisuudet on selvitettävä.</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa sekajätteestä erilleen lajitellun paperi- ja pahvikuitujakeen hyödyntämisen mahdollisuuksia ja rajoitteita. Työhön sisältyy kirjallisuuskatsaus jo olemassa olevista kierrätyskuidun ja sekajätteen paperi- ja pahvikuitujakeen hyötykäyttösovelluksista. Työssä keskitytään erityisesti uudelleenkäyttöön tai hyödyntämiseen raaka-aineena. Kirjallisessa osiossa esitetään myös tietyt kuitumassan yksikköprosessit ja prosessointimenetelmät; pulperointi, karkea- ja hienolajittelu, pyörrepuhdistus sekä vaahdotus eli flotaatio.</p> <p>Diplomityön kokeellisessa osassa selvitettiin sekajätteestä erotetun kuitujakeen kokojakauma sekä kuitupituudet ja lisäksi arvioitiin prosessointivaiheiden vaikutuksia kuidun puhdistumiseen ja laatuominaisuuksiin erilaisin laboratorioskokein ja -analysein. Työssä vertailtiin myös kahden erilaisen pulperointitekniikan ja eri jauhatusteiden vaikutusta lopputuotteen lujuusominaisuuksiin sekä kuidun pituuteen. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (FESEM) tutkittiin sekajätteen kuitufraktiosta tehdyistä arkeista pinnan morfologiaa sekä kuitujen sitoutumista.</p> <p>Pulperointi sekajätteen kuitujake lajiteltiin täryseulalla sekä painelajittimella, minkä jälkeen saatu akseptijae puhdistettiin flotaatimella. Flotaation akseptista valmistettiin laboratorioarkit fysikaalisten ominaisuuksien mittausta varten. Testiarkkien lujuusmittauksissa saadut tulokset olivat sekajätteestä erotetulla kuidulla selvästi heikompia verrattuna referenssinä käytettyyn, kuitupituudeltaan sekä koostumukseltaan vastaavaan keräyspaperi-/pahvi-massaan. Tulos viittaa sekajättekuitujakeen heikentyneeseen rakenteeseen, mikä johtunee kuidun mikrobiologisesta hajoamisesta, jota pitkä säilytysaika ja altistuminen lämmölle ennen kylmäsäilytystä on vielä nopeuttanut. Sekajättekuitumassalla korkeampi jauhatuste heikensi lujuusominaisuuksia sekä lyhensi kuidun keskiarvopituutta selvästi rajummin kuin referenssikuidulla. Näistä tuloksista on pääteltävissä yksittäisen kuidun heikkous, sillä kuitupituudessa ei lähtötilanteessa ollut eroa, vaan vasta korkeampi jauhatuste paljasti heikon rakenteen selvemmin. Tutkittu sekajätteestä erotettu kuitu oli kuitenkin prosessoitavissa esimerkiksi tahmojen osalta hyvin, sillä makrotahmojen määrä saatiin käsittelyssä laskettua jatkoprosessoinnin tavoitetasolle. Lopputuotteessa tahmoja oli noin 2000 mm²/kg. Myös pulperoinnissa irronneita likapartikkeleita saatiin poistettua flotaatiossa noin 80 % alkuperäisestä määrästä. Tämän työn tutkimusten tuloksena selvisi myös, että siistaus tai peroksidivalkaisu ei nosta sekajätteestä erotetun kuitumassan vaaleutta riittävästi, joten painopaperikäyttösovellukset eivät ole mahdollisia.</p> <p>Sekajätteestä erilleen lajitellun kuidun mahdollinen käyttökohde voisi olla kartonkiteollisuudessa, edellyttäen, että neitseellisen pitkän kuidun lisäksi saadaan parannettua lujuusominaisuuksia. Koska sekajättekuitumassa ei täyty uusiomassalle asetettuja vaatimuksia pinnan ominaisuuksien, lujuuden sekä optisten ominaisuuksien osalta, todennäköisempi käyttökohde sekajättekuidulle tulee olemaan sovelluksissa, joissa kuidun pituus ja lujuus eivät ole käyttöä rajoittavia tekijöitä. Eräs mielenkiintoinen sovelluskohde voisi olla käyttö kuitukomposiiteissa, missä paperi- tai pahvikuitu yhdistetään esimerkiksi muovipolymeereihin ja tällaisia hyötykäyttömahdollisuuksia jätteestä erotetulle kuidulle tulisi selvittää tarkemmin.</p>			
Muita tietoja			

Degree Programme International Green Chemistry and Bioproduction Educational Programme		Thesis supervisor Körkkö, M. Dr. (tech.)	
Author Ojala, Jonna Marika		Thesis mentors Körkkö, M. Dr. (tech.) Ämmälä, A. Dr. (tech) Soini, J. Dr. (tech)	
Title of Thesis Utilization potential of paper & paperboard fraction of municipal solid waste stream			
Major Subject Environmental Engineering	Type of Thesis Master of Science	Submission Date August 2014	Number of Pages 104
<p>Abstract</p> <p>During the year 2012, the amount of municipal solid waste (MSW) in Finland increased to 2.7 million tons. One third of the total amount is recovered as energy and one third is re-used or utilized as a raw material in novel applications. There are still 900 000 tons of unsorted waste ending up to the local landfills annually. EU landfill directive is forbidding further landfilling of organic and biodegradable fraction of MSW 1.1.2016. New legislation is targeting to reduce the landfilling rate of non-pretreated municipal solid waste down to 20%. To reach this goal, novel utilization applications for different fractions of municipal solid waste need to be found.</p> <p>The objective of this thesis was to study the potential and possible restrictions of municipal solid waste paper and board fiber fraction utilization. The literature survey reviews the existing utilization applications for recycled fiber and MSW fiber emphasizing mostly re-use and recycling. The most common recycled fiber processing techniques such as pulping, coarse and fine screening, cleaning and flotation are presented in the literature section.</p> <p>MSW fiber fraction was pulped, screened with vibrating and pressure screens and the accepted fraction was processed by flotation deinking. The experimental part includes studying the quality features (fiber length, fiber size distribution) of fractionated MSW paper and board fiber. The processability of MSW fiber was estimated with several laboratory tests and analyses. Two different pulping techniques and three different refining times with PFI –type laboratory pulp beater were compared and their influence on fiber length and physical strength properties were evaluated. Scanning electron microscopy (FESEM) was applied for imaging of sheet surface to reveal the differences between MSW fiber samples and reference samples.</p> <p>On the basis of the results of this work, the MSW pulp can be well processed for example in the removal of stickies and dirt particles. The area of stickies in the final product was 2000 mm²/kg which meets the specifications for removal of adhesives in recycled pulp. The amount of dirt particles was 80 % lower after the pulp was processed. It was also found out that there is minor effect of de-inking or peroxide bleaching on pulp brightness and that the studied MSW fiber is not applicable in products where high brightness level is needed.</p> <p>Laboratory handsheets were prepared from processed MSW fiber fraction for the measurement of physical properties. Results showed that the structure of the fibers was weak and they did not last process stages without breaking. The length-weighted fiber length was 1.03 mm after pulping but the length was rapidly shortened during PFI refining, which revealed the deteriorated structure of fiber. The reason for poor strength properties can be the long preservation time and exposure to the heat which accelerates the microbial degradation and thus loss of i.e. cellulose in fiber structure. MSW fiber strength properties (tensile, burst, tear) were extremely poor when compared to fiber fraction which was not contaminated with biowaste. The PFI refining did not improve the strength in studied samples.</p> <p>Paper and board fiber fraction, separated from municipal solid waste stream, does not meet the specifications for strength or optical properties of the recycled pulp. Utilization in corrugated cardboard might be possible, if certain amount of virgin fiber is added to enhance the strength properties. Applications where fiber length and strength are not crucial factors are the most interesting ones. One potential way to utilize MSW fiber is fiber-plastic composite materials, where paper or board fiber is combined with plastics.</p>			
Additional Information			

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Oulun yliopistossa Teknillisen tiedekunnan Prosessi- ja ympäristötekniikan osastolla, kuitu- ja partikkelitekniikan laboratoriossa 1.10.2013 - 30.4.2014 välisenä aikana. Työ tehtiin yhteistyössä Ekokem Oyj:n kanssa ja tutkimuksen aihe oli osa nelivuotista julkisen ja yksityisen sektorin yhteistä Tulevaisuuden kestävä bioenergiaratkaisut (BEST) –ohjelmaa. Diplomityöntekoprosessi oli tiivistahtinen ja vaihteleva, eikä olisi onnistunut ilman asiantuntevia tukijoukkoja. Siispä nyt, kun mustakantinen kirja on käsissäni, muutamat kiitokset ovat paikallaan.

Ensiksi kiitos professori Jouko Niinimäelle diplomityöni mahdollistamisesta ja mielenkiinnosta työtäni kohtaan.

Erityiset kiitokset kuuluvat ehdottomasti työtä ohjanneelle Mika Kōrkölle asiantuntevista näkemyksistä sekä kannustavasta ja positiivisesta suhtautumisesta diplomityöhöni kiireisestä keväästä huolimatta. Kiitos myös Ari Ämmälälle työn alkuvaiheen suunnittelusta ja ideoinnista.

Haluan kiittää myös tutkimuksen aiheen antaneen Ekokem Oyj:n edustajia Camilla Wiikiä sekä Jaakko Soinia hyvin sujuneesta yhteistyöstä ja arvokkaista kommentteista työhöni liittyen.

Suureksi avuksi etenkin työn alkuvaiheissa olivat laboratorion ”ihmemiehet” Jani Österlund sekä Jarno Karvonen, ilman teitä ei kokeellinen työ olisi edennyt näin joutuisasti. Lämpimät kiitokset kuuluvat erityisesti myös koko tämän laboratorion henkilökunnalle. Sen lisäksi, että olen saanut teiltä paljon uutta tietoa ja apua monenlaisiin ongelmiin, olette varmasti pidentäneet ikääni useilla vuosilla.

Erityisen kiitollinen olen lähimmilleni. Ilman heitä tämä olisi ollut mahdotonta.

Oulussa 25.5.2014

Jonna Ojala

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Termit ja niiden määritelmät

1 Johdanto.....	11
1.1 Työn tausta	11
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus	12
1.3 Tutkimuksen rakenne ja toteutus	12
2 Jätehuollon tavoitteet yhdyskuntajätteen käsittelyssä	13
2.1 Jätteen käsittelyn nykytilanne	13
2.2 Muuttuva lainsäädäntö	18
2.2.1 Jättesuunnitelma	18
2.2.2 Jätelaki.....	19
2.2.3 Jäteverolaki	19
2.3 Yhdyskuntajätehuollon tavoitteet.....	19
3 Sekajätteestä erotetun kuitumaisen aineksen hyödyntäminen	21
3.1 Jätteiden jalostaminen tuotteiksi	21
3.2 Sekajätteen määritelmä ja koostumus	21
3.3 Sekajätteestä erotetun kuidun hyödyntämisen rajoitteista	23
3.3.1 Kuitujakeen erilleen lajittelu yhdyskuntajätteestä	23
3.3.2 Sekajätteen sisältämän kuidun heterogeeninen koostumus.....	24
3.3.3 Kosteuden vaikutukset	24
3.3.4 Painoväreissä käytetyt mineraaliöljyt	25
3.3.5 Täyteaineet	25
3.3.6 Mikro-organismit	26

4 Jätekuidun käyttömahdollisuudet	27
4.1 Yhdyskuntajätteen prosessoiminen materiaalinkäsittelylaitoksessa	27
4.2 Kierrätyskuidun käyttösovelluksia.....	29
4.3 Sekajätteestä erotetun kuidun jalostaminen biopolttoaineiksi	32
5 Kuidun erotus- ja puhdistustekniikat	33
5.1 Kuidun pituuteen perustuva lajittelu	33
5.1.1 Karkea lajittelu täryseulalla.....	33
5.1.2 Painesihdit	34
5.1.3 Putkivirtausfraktiointi	34
5.2 Tiheyteen tai pinta-alaan perustuva puhdistus	35
5.2.1 Elutriaatio	35
5.2.2 Pyörrepuhdistus.....	35
5.3 Partikkelien ominaisuuksiin perustuva puhdistus	36
5.3.1 Vaahdotussiistaus eli flotaatio	36
KOKEELLINEN OSUUS	38
6 Sekajätekuidun tutkimus	39
6.1 Tutkimukseen käytetty raaka-aine	39
6.2 Prosessointiketjun kuvaus	40
6.3 Tutkimusmenetelmät.....	41
6.3.1 Kuitunäytteen pulperointi korkeassa sakeudessa tai märkähajotuksella.....	41
6.3.2 Elutriaatio	43
6.3.3 Painelajittelu.....	44
6.3.4 Flotaatio	45
6.3.5 Hyperpesu	45
6.4 Analyysit	46
6.4.1 Kuitujakauman analysointi putkivirtausfraktioinnin avulla.....	46
6.4.2 Kuiva-aine ja tuhkapitoisuus.....	46
6.4.3 Optiset mittaukset arkeista	46

6.4.4 Likapilkut	49
6.4.5 Makrokokoiset tahmot	49
6.4.6 Arkin formaation määrittäminen	50
6.4.7 Kalorimetrinen lämpöarvo	51
6.4.8 FESEM-kuvat laboratorioarkeista	51
6.5 Raaka-aineen siistattavuuden arviointi	52
6.5.1 Kierrätettävyyden arviointi laboratoriomittakaavan siistauksen avulla	52
7 Sekajätekuidun paperiteknisen potentiaalin selvittäminen	54
7.1 Standardijauhatus ja -arkkien valmistus	54
7.2 Arkkien lujuusominaisuudet	54
7.3 Vetyperoksidivalkaisu	57
8 Mikrobiologiset rajoitteet sekajätteestä erotetun kuidun hyödyntämisessä	59
9 Tulokset ja niiden tarkastelu	60
9.1 Raaka-aineen lähtötiedot	60
9.2 Lähtömassan siistattavuus	62
9.3 Sekajätekuidun erilaisten prosessointivaihtoehtojen vertailu	64
9.3.1 Laboratoriomärkähajotuksen ja korkeasakeuspulperoinnin vaikutukset kuidun pituuteen	64
9.3.2 Painelajittelun ja sen jälkeisen flotaatiovaiheen vaikutus kuitujakaumaan ...	65
9.3.3 Painelajittelun ja flotaation vaikutus musteen, likapilkkujen ja tahmojen poistumiseen	68
9.4 Paperiteknisen potentiaalin selvittäminen	75
9.4.1 Prosessoidun sekajätekuidun lujuusominaisuudet	75
9.4.2 Sekajätekuidun lujuusominaisuuksien vertailu kierrätyskuidun lujuuteen	76
9.4.3 Kuitupituuksien vertailu eri jauhatusteissa	80
9.4.4 Arkin formaatio	82
9.4.5 Peroksidivalkaisun teho jätekuitumassalle	83
9.4.6 FESEM -kuvien vertailu	84
9.5 Mikrobiologinen analyysi	88

10 Johtopäätökset.....	89
11 Yhteenveto	91
11.1 Optiset ominaisuudet.....	92
11.2 Paperitekninen potentiaali.....	93
11.3 Kuidun prosessoitavuus perinteisin menetelmin.....	94
11.4 Mikrobien aiheuttamat ongelmat	95
11.5 Pohdinta jätekuidun käytöstä	95
12 Lähteet.....	98

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Biojäte	Muodostuu vain kompostoituvista elintarvikejätteistä ja pienistä määristä muuta eloperäistä jätettä, kuten munakennot, suodatinpussit, talouspaperi ja lautasliinat. Biojäte hajoaa biologisesti aerobisesti tai anaerobisesti.
Biohajoava jäte	Biohajoavalla jätteellä tarkoitetaan jätettä, joka nopeasti hajoaa aerobisesti hapekkaissa olosuhteissa tai anaerobisesti mätänemällä. Biohajoava jäte voi sisältää keittiö- ja puutarhabiojätteen lisäksi kuitupohjaista jätettä, kuten puuta, paperia ja kartonkia sekä lietettä tai lantaa. (vrt. biojäte)
Energiahyödyntäminen	Jätteen käyttäminen energianlähteenä Jätteenpolton kautta tuotettavalla sähköllä ja lämmöllä voidaan korvata fossiilisten polttoaineiden sekä ydinvoiman käyttöä.
Jätteenpoltto	Poltto on jätteen termistä prosessointia hapellisissa olosuhteissa. Jätteenpoltossa saatu energia hyödynnetään lämpönä ja/ tai sähköinä. Jätteenpoltolla tarkoitetaan samaa kuin termillä energiahyödyntäminen.
Jätteen synnyn ehkäisy	Toimintaa, jonka avulla ehkäistään jätteen syntymistä. Jätteen syntymistä ehkäiseviä toimintoja ovat tuotteiden käyttöä pidentäminen tai yhteiskäyttö sekä materiaallisen kulutuksen vähentäminen. Myös haitallisten ja/tai myrkyllisten aineiden käytön vähentäminen sekä tuotteiden uudelleenkäyttö alkuperäisessä tai muussa tarkoituksessa ehkäisee jätteen syntymistä.
Jätteiden kierrätys	Jätteiden kierrätys viittaa niiden käyttämiseen raaka-aineena tai materiaalina. Jätteiden energiakäyttö eli poltto ei ole kierrätystä, vaikkakin se on resurssien hyödyntämistä. Myöskään uudelleenkäyttö ei ole kierrätystä, mutta sen avulla voidaan ehkäistä jätteen syntyä.
Materiaali- hyödyntäminen	Jätteen hyödyntäminen uudelleen raaka-aineena, kierrättämällä tai palauttamalla jäte uudelleenkäyttöön.
OCC	Aaltopahvijätettä (old corrugated container), joka koostuu kahdesta liner-kerroksesta ja niiden väliin jäävästä flutingista eli aallotuskartongista.
Orgaaninen aines	Orgaaninen aines on elollisesta luonnosta peräisin olevaa ainesta, joka muodostuu hiilestä ja muista alkuaineista. Biohajoavat jätteet ovat orgaanisia, mutta kaikki orgaaninen jäte ei aina ole biohajoavaa. Orgaanisia aineksia ovat mm. muovit ja kumi.

Sekajäte	Sekajätteellä tarkoitetaan lajittelematonta yhdyskunta-, teollisuus- tai rakennusjätettä. Sekajäte on hyödyntämiskelvotonta ja käsitellään tavallisesti kaatopaikkaamalla tai polttamalla voimalassa.
Siistaus	Menetelmäketju, jonka avulla uusiomassasta poistetaan painovärejä sekä muita epäpuhtauksia. Siistattua massaa kutsutaan DIP-massaksi (de-inked pulp).
Syntypaikkalajittelu	Syntypaikkalajittelulla tarkoitetaan jätteiden lajittelua ja erillään pitämistä niiden syntypaikoilla.
Tahmot	Tahmot ovat tahmaisia epäpuhtauksia uusiokuitumassassa. Erikokoiset tahmopartikkelit ovat peräisin liima-aineista, vahoista ja latekseista, joita on käytetty paperinvalmistuksen jatkoprosesseissa.
Uudelleenkäyttö	Uudelleenkäyttö on toiminto, jossa käytöstä poistettuja tuotteita käytetään uudestaan samassa käyttötarkoituksessa.
Uusiokäyttö	Käytöstä poistetun tuotteen eli jätteen uudelleen käyttäminen raaka-aineena uudessa käyttötarkoituksessa.
Uusiomassa	Keräyspaperista valmistettu massa, joka voidaan käyttää uudelleen paperin tai jonkin muun tuotteen raaka-aineena.
Yhdyskuntajäte	Yhdyskuntajätteellä tarkoitetaan kotitalouksissa asumisen seurauksena syntyvää jätettä. Tavallisimmin lajittelematon yhdyskuntajäte loppusijoitetaan kaatopaikalle ns. sekajätteenä.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Kasvavat tuotantokustannukset sekä kiristynvä kilpailutilanne ajavat tutkimus- ja tuotekehitystä suuntaan, missä jätteistä muodostetaan raaka-ainetta uusiin prosesseihin. Ympäristönäkökulmasta katsottuna jäte täytyy oppia näkemään resurssina, oli tavoitteena sitten materiaalihyödyntäminen uuden tuotteen raaka-aineena, hyödyntäminen energiana polttamalla tai vaihtoehtoisesti biologinen käsittely kompostoinnin tai mädätyksen avulla.

Sekä materiaalihyödyntämisen että energiahyödyntämisen osuudet jätteiden käsittelyssä tulevat kasvamaan uuden 1.1.2016 voimaantulevan jätelain ajamana. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013) tehostaa uudelleenkäyttöä sekä kierrätystä kieltämällä orgaanisen aineksen sekä biohajoavan jätteen sijoittamisen kaatopaikoille. Ensisijainen keino pidentää tuotteen elinkaarta on käyttää se jätehierarkian mukaisesti uudelleen alkuperäisessä käyttötarkoituksessaan (uudelleenkäyttö) tai kierrättää se uusioraaka-aineeksi. Vaihtoehtoisten ja uusien jätteidenkäsittelytapojen merkitys tulee korostumaan entisestään, sillä uuden jätelainsäädännön mukaisesti jätteen kaatopaikkaus on hyväksyttävää ainoastaan jos jätteen hyödyntäminen muulla tavoin ei ole teknisesti tai taloudellisesti mahdollista.

Vaikka keräyspaperin kierrätysaste on Suomessa erinomainen, paperiteollisuus on joutumassa tilanteeseen, missä keräyspaperista on pula kulutuksen vähentyessä. Pidemmällä aikavälillä tämä johtaa keräyspaperin hinnan nousuun ja kierrätyskuitua raaka-aineenaan käyttävien tehtaiden tuotannon heikkenemiseen. Yhdyskuntien tuottamaan sekajätteeseen päätyy arviolta 15–20 % paperia, kartonkia sekä pahvia, joiden hyödyntäminen keräyspaperin sijaan osana paperi- ja pakkausmateriaalinvalmistusta laajentaisi raaka-ainepohjaa ja toisi taloudellista kilpailukykyä.

Tässä opinnäytetyössä kiinnostus on erityisesti juuri sekajätteestä lajitellun kotikeräyspaperin (lehdet, mainokset, kirjekuoret sekä uusiopaperi ja värjätty paperi), keräyskartongin (maito- ja mehutölkit) ja keräyspahvin (ruskea pahvi) hyödyntäminen. Tutkimusmenetelminä käytetään tavallisia kierrätyspaperin siistausprosessissa käytettäviä osaprosesseja, kuten vaahdotusta sekä lajittelua seulomalla ja painesihdillä. Kuitumassan valkaisua testataan laboratoriomittakaavassa vetyperoksidilla.

Paperiteknisen potentiaalin arvioinnissa käytetään lisäksi jauhatusta, mikä usein parantaa lopputuotteen lujuusominaisuuksia. Vertailukohtana analyyseissä käytetään referenssimassaa, joka on keräyspaperista ja –pahvista tehty kuitulajitelma, joka ei ole ollut kontaktissa biojätteeseen, eikä mikrobiologista hajoamista kuidun rakenteessa ole tapahtunut.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön tavoitteeksi asetettiin selvittää sekajätteestä erotetun kuitujakeen mahdollisia hyötykäyttösovelluksia ja niihin liittyviä rajoitteita. Työssä keskitytään selvittämään erilaisia prosessointivaihtoehtoja ja testaamaan valittuja yksikköprosesseja sekä arvioimaan niiden vaikutusta kuidun puhdistumiseen, optisiin laatuominaisuuksiin ja lujuusominaisuuksiin.

1.3 Tutkimuksen rakenne ja toteutus

Työ aloitetaan esittämällä jätteiden käsittelyn nykytilanne sekä jätehuollon tavoitteet EU:n alueella sekä perehdytään myös jätteenkäsittelyä ohjaavaan lainsäädäntöön. Työn kirjallisuusosiossa esitellään kehitteillä olevia ja jo käytössä olevia kierrätyskuidun käyttökonsepteja sekä sekajätteen paperikuitupohjaiselle fraktiolle kehitettyjä käsittelymenetelmiä. Uusien jätteenkäsittelymenetelmien määrä on vähäinen ja julkista tietoa on huonosti saatavilla. Tässä työssä on esitelty sekajättekuidun mahdollisia materiaalihyödyntämiseen painottuvia käyttökohteita.

Kokeellisessa osassa arvioidaan jätteestä erotetun kuidun hyödyntämisen potentiaalia erilaisissa sovelluksissa käsittelemällä kuitua uusiomassan valmistuksen tavoin ja analysoimalla kuidun puhdistumista prosessoitaessa sekä vertaamalla sekajätteestä erotetun kuidun ominaisuuksia keräyskuidun ominaisuuksiin.

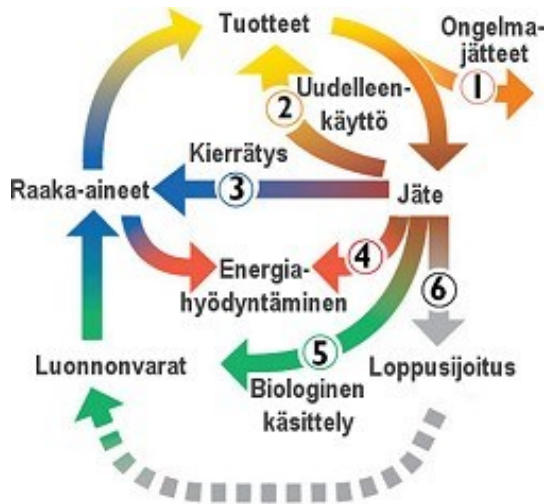
Kierrätyskuitujen, kuten myös sekajätteestä erotettujen paperikuitujen käytön haasteena ovat erityisesti kuidun lujuusominaisuudet sekä optiset laatuominaisuudet. Tämän työn keskeinen tarkoitus on selvittää sekajätteestä erotetun kuidun käytön rajoituksia ja myös prosesseja, joilla kuidun jalostusarvoa voidaan nostaa mahdollisten hyödyntämiskohteiden monipuolistamiseksi.

2 JÄTEHUOLLON TAVOITTEET YHDYSKUNTAJÄTTEEN KÄSITTELYSSÄ

2.1 Jätteen käsittelyn nykytilanne

Jos tarkastellaan jätteen käsittelyn nykytilannetta, huomataan, että jäteala on ollut viimeiset 10 vuotta suurten muutosten alla. Ympäristönormit ja -lait ovat tiukentuneet ja ne seuraavat tiiviisti EU:n lainsäädäntöä. Uusimman jätedirektiivin hyväksymisellä pyritään ohjaamaan erityisesti yhdyskuntajätteen polttoa ja kaatopaikkausta. Jätehuollon tavoitteet on tarkemmin määritelty uudessa jätesuunnitelmassa. Sekajätteen kaatopaikkauksen osuuden toivotaan vähenevän vuoden 2016 orgaanisen aineksen kaatopaikkauksiellon vuoksi 20 prosenttiin. Lisäksi jäteasetus velvoittaa kierrättämään vähintään 50 % yhdyskuntajätteestä. Jätteiden käsittelyn etusijajärjestystä pyritään valvomaan ja seuraamaan aiempaa tarkemmin, jotta suunnitelman mukainen tavoitetila toteutuisi vuonna 2016. Jätesuunnitelman etusijajärjestyksen mukaisesti ensisijaisesti pyritään vähentämään jätteen syntyä. Toiseksi tulisi mahdollistaa sen uudelleenkäyttö ja kierrättäminen. Vasta sen jälkeen suositellaan hyödyntämistä energiana ja viimeisimpänä vaihtoehtona esitetään loppusijoitusta kaatopaikalle. (Ympäristöministeriön julkaisu 2008)

Kuvassa 1 on esitetty tuotteiden syntyminen luonnon raaka-aineista ja niiden päätyminen jätteeksi. Jätteen syntymisen jälkeen valittavana on useita reittejä, joilla jäte palautetaan takaisin kiertoon. Vaihtoehtoina on palauttaa jäte takaisin raaka-aineeksi kierrättämällä (3) tai hyödyntää se energiana polttamalla (4). Uudelleenkäyttö (2) on myös materiaalihyödyntämistä, kun sama tuote palautuu puhdistettuna alkuperäiseen käyttötarkoitukseensa. Biologinen käsittely eli kompostointi (5) tai mädätys palauttaa jätteen takaisin luontoon, jolloin syntyy uusia raaka-aineita. Jätteen loppusijoitus eli kaatopaikkaus (6) pitäisi olla viimeisin vaihtoehto näistä, sillä kaatopaikatuista jätteistä saatava hyöty on marginaalinen.



Kuva 1. Jätteen syntyminen ja erilaiset käsittelyvaihtoehdot yhdyskuntajätehuollossa (Jätelaitosyhdistys 2014)

Syyt, miksi kaatopaikkausta halutaan rajoittaa, ovat yksinkertaiset. Kaatopaikoille päätyvä biohajoava, orgaaninen jäte tuottaa anaerobisesti hajotessaan biokaasua, pääasiassa metaania, joka on yksi kuudesta kasvihuonekaasusta. Suomen kaikista kasvihuonekaasuista noin kolme prosenttia syntyy kaatopaikoilla. (Mroueh *et al.* 2007, Kasvihuonekaasut 2012) Vähentämällä kaatopaikattavan orgaanisen aineksen määrää, voidaan tehokkaasti vaikuttaa myös syntyvien kasvihuonekaasujen määrään. (Kasvihuonekaasut 2012). Syntyvän kaatopaikkakaasun määrä on vähentynyt vuodesta 1994 4,9 %:sta vuoden 2005 3 %:iin. (Mroueh *et al.* 2007). Suunta on edelleen ollut laskussa ollen viimeisimpien vuoden 2011 tietojen mukaan noin 2,8 %. (Kasvihuonekaasut 2012). Vähentämiseen on vaikuttanut syntypaikkalajittelun tehostumisen lisäksi myös kaatopaikkakaasujen talteenoton lisääntyminen. (Mroueh *et al.* 2007).

Yhdyskuntajätteen on siis määritelty olevan asumisessa lopputuotteen kuluttamisen seurauksena syntyvää jätettä. Tähän voidaan katsoa kuuluvaksi myös teollisuuden tai palvelutoiminnan jätettä siltä osin, kun sen koostumus ja ominaisuudet ovat vastaavat kuin kotitalousjätteessä. (Rättö *et al.* 2009) Tilastokeskuksen selvityksen mukaan kaatopaikalle kuljetetusta kaikesta jätteestä lähes 97 % on yhdyskuntien sekajätettä. (Jätetilasto 2012).

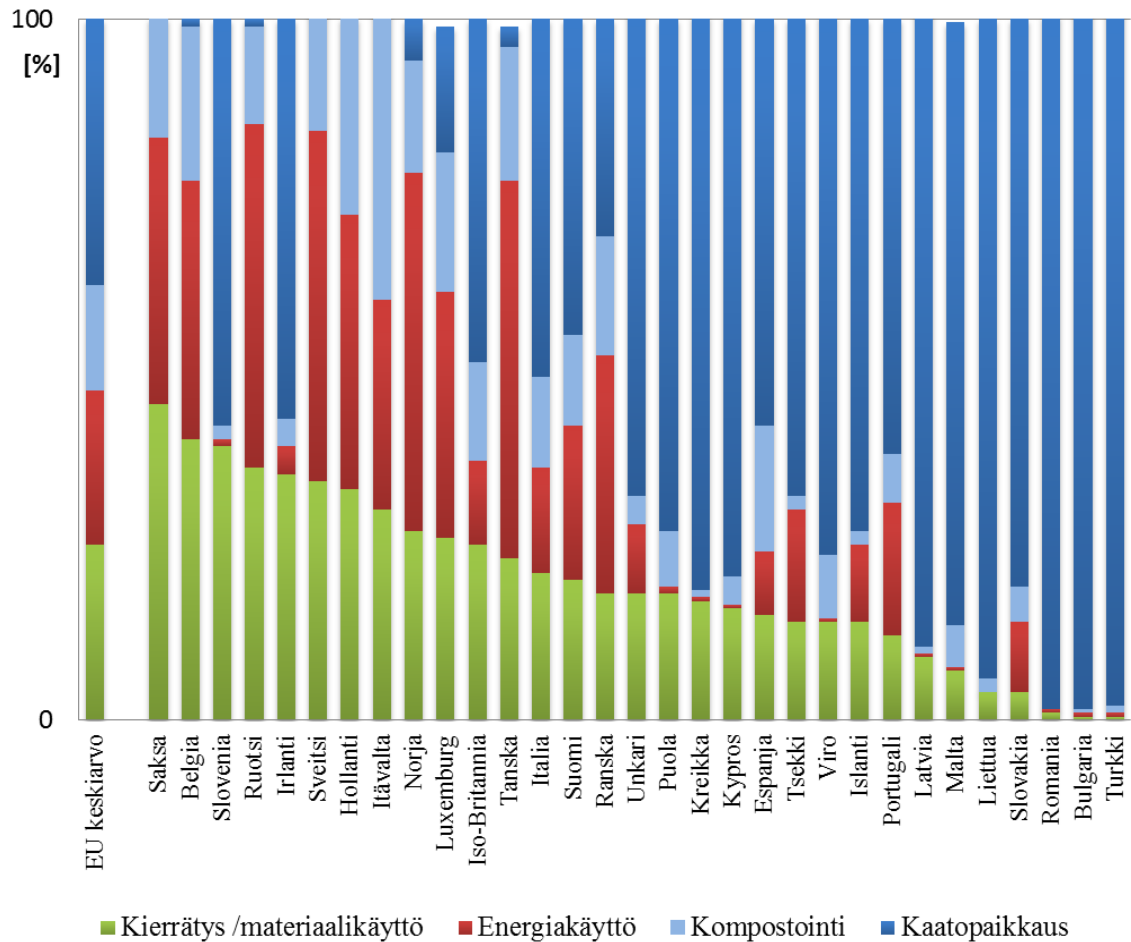
Tilastokeskuksen julkaisemasta tilastosta (Yhdyskuntajätteet 2012) käy ilmi kaatopaikkasijoituksen osuus syntyneestä yhdyskuntajättemäärästä vuonna 2012, joka

oli ensimmäistä kertaa laskenut alle miljoonan tonnin (901 000 t). Vielä vuoden 2011 vastaavassa tilastossa kaatopaikkauksella oli suurin osuus kaikista käsittelytavoista, mutta tällä hetkellä energiahyödyntäminen eli jätteenpoltto on kasvattanut osuuttaan suurimmaksi (925 000 t). Polton osuus jätteen käsittelyssä kasvoi erityisesti yhdyskuntien sekajätteen käsittelyssä, mutta sen osuuden odotetaan muutamien vuosien kuluttua vähenevän, kun materiaalikäyttöä tehostetaan. Materiaalikäyttöön ohjautuu Suomessa nyt 912 000 t jätettä. Kuvassa 2 on esitetty syntyneiden jätteiden määrät ja niiden eri käsittelytavat. Tällä hetkellä voisi sanoa eri käsittelyvaihtoehtojen olevan lähes yhtä todennäköisiä. (Yhdyskuntajätteet 2012)



Kuva 2. Yhdyskuntajätteiden käsittely vuonna 2012. (Tilastokeskus 2012)

EU-maissa yhdyskuntajätteen käsittelytavat sekä jätehuollon tila vaihtelevat paljon. Jos tarkastellaan jätteiden käsittelyä materiaalihyödyntämisen suhteen (ks. kuva 3), huomataan, että edelläkävijöitä tässä ovat Saksa, Belgia, Slovenia, Ruotsi sekä Irlanti, joissa materiaalihyödynnettäväksi päätyy noin 35-40 % jätteestä. Eurostatin (*The Statistical Office of the European Communities*) julkaisemassa vuoden 2010 tilastossa Suomi asettuu noin 30 maan joukossa puoliväliin. (Eurostat 2010) Edelleen on myös maita, joissa lähes kaikki syntynyt jäte sijoitetaan kaatopaikoille. Esimerkiksi Turkki, Bulgaria sekä Romania sijoittavat 98-prosenttisesti yhdyskuntajätteensä kaatopaikoille. Tanska, Sveitsi ja Norja taasen hyödyntävät lähes kaiken polttokelpoisen jätteen energiana. Kaatopaikalle sijoitetaan vain noin 5 %, sillä kaikki orgaanista ainesta sisältävät jätteet hyödynnetään termisesti, kierrättämällä tai biologisesti.

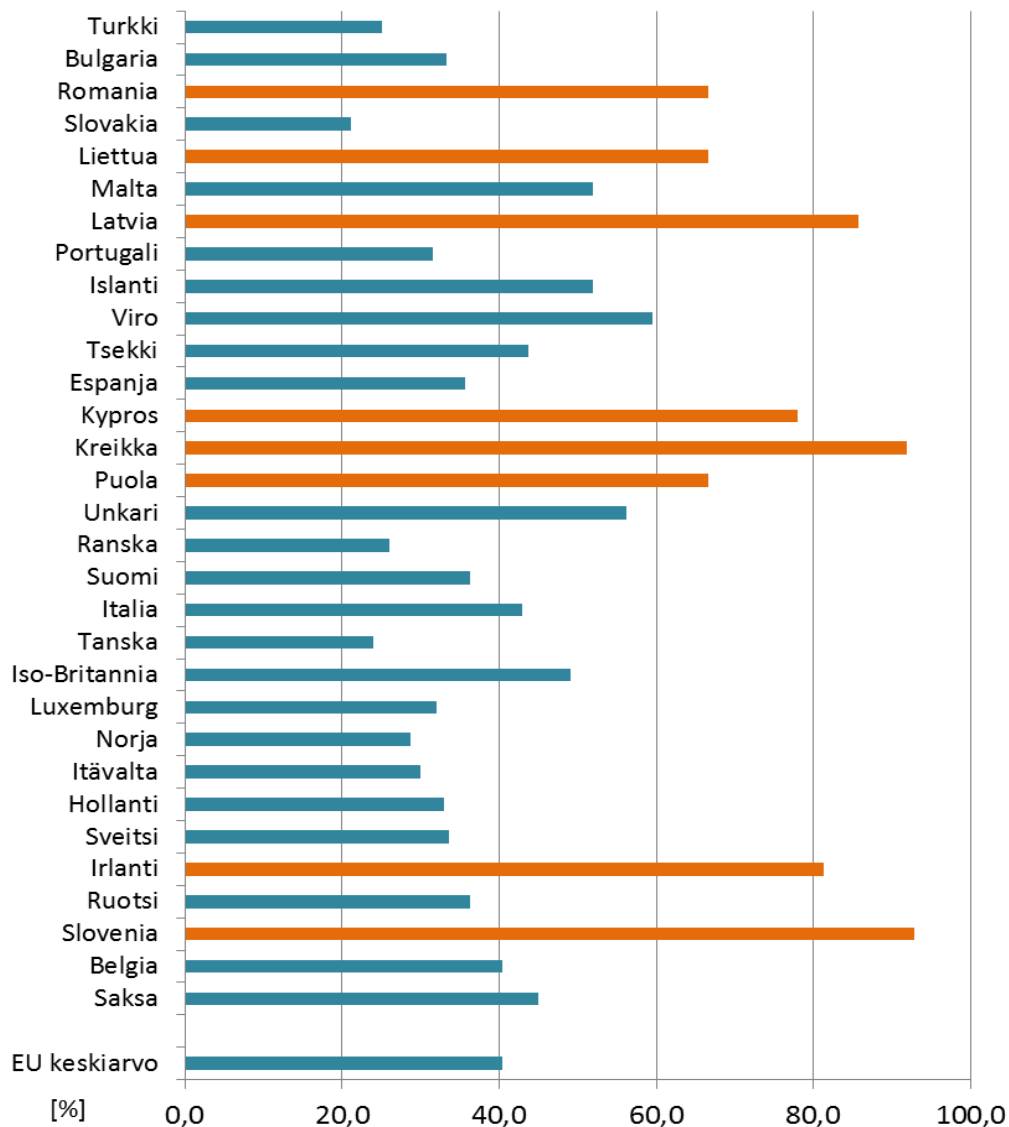


Kuva 3. Yhdyskuntajätteen käsittelytavat eri EU-maissa vuonna 2010. Lajittelu-
perusteena on käytetty materiaalihyödyntämisen osuutta. (Eurostat 2010)

Tarkasteltaessa jätteidenkäsittelytapoja ainoastaan niiden hyödyntämisen osalta ja ver-
rattaessa EU-maiden jätteiden materiaalihyödyntämistä suhteessa jätteiden kokonais-
hyödyntämiseen, erottuvat listalta aivan muut maat kuin äsken mainitut. Kuvassa 4 on
esitetty hyödyntäminen materiaalina kierrättämällä tai uusiokäytössä suhteessa kaikki
hyödyntämisvaihtoehdot (poltto, biologinen hyödyntäminen ja kierrätys/uusiokäyttö)
käsittävään kokonaishyödyntämiseen. Kaatopaikkauksen osuus on jätetty pois, sillä se
ei ole hyödyntämistä, vaan ainoastaan loppusijoitusta.

Kuvasta 4 selviää, että EU:n alueella yli 90 % materiaalina hyödyntäviä maita vuonna
2010 olivat Slovenia, Kreikka ja Latvia. Tämä havainto on mielenkiintoinen siitäkin
syystä, että Suomi on materiaalihyödyntämisessä heikoimpien maiden joukossa reilun
30 %:n materiaalihyödyntämisasteellaan. Myös Saksassa ja Belgiassa, joissa kaatopaik-
kaus ei ole juurikaan käytetty jätteenkäsittelyvaihtoehto, materiaali-hyödyntäminen on
silti vähäistä verrattuna maihin, jotka pystyvät kierrättämään tai uusiokäyttämään raaka-

aineena suurimman osan jätemateriaalista. Materiaalikäytön vähyys selittyy osin sillä, että näissä maissa energiakäytöllä on suuri painoarvo. Saksassa esimerkiksi on 75 jätevoimalaa, jossa poltetaan yhdyskuntajätettä yhteensä 21 Mt/vuosi. Vastaavassa tilastossa Suomen vuotuiseksi polttoon ohjautuvaksi jätemääräksi ilmoitettiin 0,3 Mt, joka poltetaan kolmessa eri jätteenpolttolaitoksessa. Tilaston tiedot ovat osin vanhentuneet sillä vuonna 2013 Suomessa toimi jo 7 jätteenpolttolaitosta. (Jätelaitosyhdistys 2014)



Kuva 4. Jätteiden materiaalihyödyntämisen osuus kokonaishyödyntämisestä (sis. energiahyödyntäminen, kompostointi sekä materiaalihyödyntäminen) eri EU-maissa vuonna 2010. (Eurostat 2010)

Energiahyödyntämisen kasvun odotetaan lähivuosina hidastuvan ja antavan tilaa materiaalihyödyntämiselle, mihin myös uudet jätedirektiivit ohjaavat. Tämä tulee varmasti näkymään seuraavien vuosien tilastoissa.

2.2 Muuttuva lainsäädäntö

Jätehuoltoa ohjaavat ja säättävät useat lait ja asetukset. Jätehuollolle on asetettu tiukkoja vaatimuksia ja rajoituksia mm. jätteiden synnyn vähentämisestä, materiaalin kierrätyksestä sekä ympäristövaikutusten minimoimisesta. (Mroueh *et al.* 2007) Ympäristöministeriö on valmistellut jättesuunnitelman, missä selvitetään tarvittavat käytännön toimenpiteet, millä jätehuoltoa kehitetään, luonnonvarojen järkevää käyttöä edistetään ja jätteistä aiheutuvia vaaroja sekä ympäristö- ja terveyshaittoja ehkäistään. (Ympäristöministeriön julkaisu 2008)

2.2.1 Jättesuunnitelma

Valtioneuvoston 10.4.2008 hyväksymässä jättesuunnitelmassa ydinajatus on viisitasoisen jätehierarkian toteutuminen. Suunnitelman avulla pyritään hallitsemaan jätehuollon kaikkia vaiheita ja luodaan EU:sta kierrätysyhteiskuntaa, joka minimoi syntyvän jätteen määrän sekä ohjaa syntyvän jätteen uusiokäyttöön. Ympäristöministeriö sekä Suomen ympäristökeskus valvovat jättesuunnitelman toteutumista. (Ympäristöministeriön julkaisu 2008)

Suunnitelman viisi eri porrasta tärkeysjärjestyksessä ovat:

1. Jätteen synnyn ehkäisy
2. Uudelleenkäyttö
3. Materiaalikierrätys
4. Energiana hyödyntäminen
5. Loppukäsittely kaatopaikoilla

Etusijajärjestyksessä uudelleenkäyttö ja materiaalina kierrätys ovat toivottavampia jätteenkäsittelymenetelmiä kuin energiahyödyntäminen. Vaikka etusijajärjestys sitoo kunnan toimijoita ja jätteen käsittelijöitä, on otettava huomioon toimijan tekniset ja taloudelliset edellytykset toimia jätehierarkian mukaan. Energiakäyttöön menevä jäte käsitellään parhaalla mahdollisella saatavissa olevalla tekniikalla. (Rintala 2013) Yhdyskuntajätteen määrän toivotaan lähtevän laskuun viimeistään vuonna 2016 ja näiden toimien avulla tavoitellaan tilannetta, missä yhdyskuntajätteestä puolet päätyisi kierrätettäväksi materiaalina ja 30 % ohjautuisi energiakäyttöön. Tällöin kaatopaikalle loppusijoitettavan jätteen osuus olisi ainoastaan 20 %. (Ympäristöministeriön julkaisu 2008)

2.2.2 Jätelaki

Uusi jätelaki (646/2011) tuli voimaan 1.5.2012 ja samalla edellinen, vuodesta 1993 voimassa ollut laki kumottiin. Uudella lainsäädännöllä pyritään vähentämään lisääntyvistä jätemääristä aiheutuvia haittoja ihmisille ja ympäristölle. Lisäksi halutaan saada jätelaki vastaamaan nykypäivän tavoitteita ympäristö- ja jätepolitiikassa sekä seuraamaan EU-lainsäädäntöä. (Teirasvuo 2011, Finlex: (646/2011))

Merkittävin muutos uudessa laissa on tuottajavastuun lisääntyminen. Lain mukaisesti tuottajalle annetaan ensisijainen mahdollisuus jätteen keräykseen. (47 §: *Tuottajan ensisijainen oikeus järjestää jätehuolto*) Tuottajien ja tuottajayhteisöjen vastuun lisäksi myös jakelijaa ja maahantuojia sitoo vastuu jätehuollon järjestämisestä. Pakkauksia, joiden tuottajana pidetään tuotteen pakkaajaa tai pakatun tuotteen maahantuojaa, koskee jatkossa täysi tuottajavastuu. (48 §: *Tuottajavastuun piiriin kuuluvat tuotteet ja tuottajat*) Finlex (646/2011))

2.2.3 Jäteverolaki

Jäteverolain uudistus tuli voimaan vuonna 2011. Nostamalla kaatopaikattavan jätteen sijoitusmaksuja pyritään taloudellisin keinoin ohjaamaan jätehuoltoa hierarkian mukaisesti pois loppusijoituksesta, kohti energia- ja materiaalihyödyntämistä. Uudistuksen seurauksena 1.1.2013 eteenpäin kaatopaikalle loppusijoitettavasta jätteestä perittävä vero on ollut 50 euroa tonnilta. (Teirasvuo 2011, Finlex (1126/2010))

2.3 Yhdyskuntajätehuollon tavoitteet

Suomessa jätehuollon tavoitteena on, että se vastaisi EU:n huipputasoa. Parhaimmillaan jätteen käsittelyyn tulisi olla tarjolla lukuisia erilaisia vaihtoehtoja kaatopaikkauksen sijasta. Yhdyskuntajätteen kaatopaikkasijoitus onkin ollut laskussa jo viimeiset viisi vuotta. (Yhdyskuntajätteet 2011). Jätesuunnitelman yhtenä tavoitteena on saada kaatopaikattavan yhdyskuntajätteen määrä vakiintumaan alle 500 000 tonniin, joka sijoitettaisiin Suomessa vuonna 2016 toimiville 30-40 kaatopaikalle. Tämä jätteenkäsittelykapasiteetti tulisi tavoitetilassa olemaan riittävä sekajätteelle. (Ympäristöministeriön julkaisu 2008)

Taulukkoon 1 on koottu ympäristöministeriön suunnitelmasta laskennalliset jätemäärien kapasiteettitarpeet eri hyödyntämistavoille vuonna 2016. Taulukossa ovat toteutuneet jätemäärät vuodelta 2006. Tällöin kaatopaikkauksen osuus käsittelyistä oli lähes 60 %. Vuoden 2016 kapasiteettitarvelaskentaan kaatopaikkaukselle jää vain noin 20 % osuus, vaikka jätemäärien arvellaan pysyvän samalla tasolla. Tämä edellyttää vaihtoehtoisten käsittelymenetelmien osuuksien kasvattamista. (Ympäristöministeriö 2008) Taulukon tavoitteita kohti on edetty suunnitelmien mukaan, sillä Suomessa polton osuus on selvästi kasvanut vuoden 2006 jälkeen. Syntyvän jätteen määrä on noussut 2,7 miljoonaan tonniin, mikä ylittää suunnitelman mukaisen arvion, mutta silti kaatopaikkauksen jätemäärä on alle miljoona tonnia. (Yhdyskuntajätteet 2012) Kierrätyksen tehostaminen ja jätemäärän kasvun pysäyttäminen ovat ainoa mahdollisuus, millä jätesuunnitelman tavoitteisiin tullaan pääsemään vuonna 2016. Nykyisellä kehityksellä asetetut tavoitteet jäävät saavuttamatta muiden kuin energiahyödyntämisen osalta. (Häkkinen *et al.* 2014)

Taulukko 1. Yhdyskuntajätteen toteutunut käsittelyn ja hyödyntämisen aste vuonna 2006 sekä laskennallinen kapasiteettitarve vuoden 2016 tavoitteen mukaiselle jätemäärälle tavoitellulla hyödyntämisasteella. (Ympäristöministeriö 2008)

Yhdyskuntajätteen hyödyntämistapa	Jäte- määrä 1000 t /v	Käsittelyn osuus %	Kapasiteetti- tarve 1000 t/v	Tavoitteet %
	Vuosi 2006		Vuosi 2016 (tavoitteet)	
Kompostointi tai mädätys	191	7	460–500	20
Materiaalikierrätys	648	25	700–750	30
Energiahyötykäyttö	222	9	700–750	30
Kaatopaikkaus	1504	59	460–500	20
YHTEENSÄ	2565	100	< 2300–2500	100

3 SEKAJÄTTEESTÄ EROTETUN KUITUMAISEN AINEKSEN HYÖDYNTÄMINEN

3.1 Jätteiden jalostaminen tuotteiksi

Yhdyskuntajätteestä suuri osa on kierrätettävää paperia, pahvia sekä muita puukuitupohjaisia tuotteita ja niiden kaatopaikkaus on sekä taloudellisesti että ympäristön kannalta tuhoavaa. (Scott & Abubakr 1994) Orgaanisen aineksen kaatopaikkauskiellon voimaantullessa 2016, näiden biohajoavien materiaalien ja muiden orgaanisten jakeiden hyödyntämiselle tulee olla toimivia ja kustannustehokkaita menetelmiä kehitettyinä.

Jätteiden käsittelyssä eletään nyt muutoksen kautta. Viimeisimpien tilastokeskuksen julkaisemien tietojen (vuosi 2011) mukaan kaatopaikkasijoitusten määrä on vähentynyt 19 %. Jätettä poltettiin 22 % edellisvuotta enemmän ja kierrätyksen osuus eli jätteiden käyttö raaka-aineena tai materiaalina kasvoi 18 %. Erityisesti tämä on merkittävä muutos, sillä kierrätykseen ei katsota kuuluvan uudelleenkäyttöä tai energiakäyttöä. Kierrätyksessä jätteelle löydetään uusi käyttötapa eli aine palautetaan uudelleen tuotantoon. (Jätetilasto 2011) Jättesuunnitelman tavoite kierrättää vuonna 2016 syntyneestä yhdyskuntajättemäärästä materiaalina 50 % on optimistinen ja siitä ollaan vielä hyvin kaukana, joskin materiaalihyödyntämisen aste on tietyillä indekseillä mitattuna kohentunut esimerkiksi teollisuudessa. (Ympäristöministeriön julkaisu 2008)

Tiukentunut jätelainsäädäntö sekä tarve esimerkiksi fossiilisia polttoaineita korvaaville polttoaineille ovat ajaneet uusien jätteiden hyödyntämisteknologioiden kehitystä Suomessa. Erityisesti kasvihuonekaasujen vähentämistä tutkittaessa on etsitty korvaavia ratkaisuja jätteiden nykykäsittelyille ja uudet jätteenkäsittelykonseptit toisivat myös liiketoimintamahdollisuuksia alalle lisää. (Mroueh *et al.* 2007)

3.2 Sekajätteen määritelmä ja koostumus

Sekajätteellä tarkoitetaan kaikkea asumisessa syntyvää yhdyskuntajätettä, mikä päättyy sekajätekeräykseen. Virallisesti termi sekajäte eli kaatopaikattava jäte pitää sisällään vain hyödyntämiskelvottomat jakeet kuten tekstiilit, kertakäyttövaipat ja terveystiteet,

posliini, nahka ja kumi, pölynimuripussit, hehku- ja halogeenilamput sekä sulakkeet, PVC-muoviset tuotteet, tuhka ja tupakantumpit sekä alumiinipinnoitetut muovit kuten kahvipaketit ja sipsipussit. Kuitenkin yhdyskuntien ja palvelusektorin tuottama sekajäte sisältää runsaasti hyödyntämiskelpoisia jakeita, kuten paperi- ja pahvikuitua, muovia, metallia, lasia sekä biojätettä. (HSY, koostumustutkimus 2013)

Lähes puolet yhdyskuntien tuottamasta sekajätteestä on orgaanista ainesta eli pääosin keräyspaperia ja keräyspahvia sekä biojätettä. (Rättö *et al.* 2009) Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä (HSY) teetti vuoden 2012 aikana tutkimuksen, missä selvitettiin pääkaupunkiseudun kotitalouksissa syntyvän sekajätteen määrää sekä koostumusta. Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan arvioida myös muun Suomen sekajätteen laatua ja hyödyntämiskelpoisen materiaalin osuutta, vaikka täysin tutkimustulokset eivät olekaan vertailukelpoisia muiden koostumustutkimusten kanssa. Sekajätettä syntyi asukasta kohden reilu 170 kg vuodessa ja määrä on lievässä kasvussa. Sekajätteen määrään sekä koostumukseen vaikuttaa alueellisen vaihtelun lisäksi asukkaiden ikäjakauma sekä asumismuoto. Yllättäen myös asunnon tai pihan koko vaikuttaa syntyvän sekajätteen koostumukseen yhtäläillä kuin vaihtelevat kulutustottumukset eri tulotasoissa. Erilliskeräyksen olemassaolo kiinteistöllä tai lähellä sijaitseva keräyspiste vähensivät tutkimuksen mukaan sekajätteen määrää. (HSY, koostumustutkimus 2013) Palvelusektorin tuottama yhdyskuntajäte on laadultaan erittäin vaihtelevaa riippuen siitä, miltä alalta jätettä syntyy. (Mroueh *et al.* 2007)

Helsingin seudun kuntayhtymän teettämässä tutkimuksessa selvisi myös, ettei ihmisten kierrätystottumuksissa ole juurikaan tapahtunut kehitystä viiden viimeisen vuoden aikana. Biojätteen osuus sekajätteessä on yhä lähes 40 %. Määrä on pienempi yli 10 asunnon kiinteistöissä, sillä niissä on pakollisena biojätteen erilliskeräys, kun vastaavasti pienempien kiinteistöiden lajittelu perustuu vapaaehtoisuuteen. Kuitupitoisen keräysmateriaalin, kuten keräyspahvin, -kartongin ja -paperin osuus tutkimuksessa kerätyssä sekajätteessä oli noin 15 %. Ilmoitetut osuudet eivät ole sellaisenaan suoraan verrattavissa muuhun Suomeen, sillä alueelliset erot ovat huomattavia. (HSY, koostumustutkimus 2013) Kaatopaikattavan hyödyntämiskelpoisen jätteen määrää pyritään vähentämään hyvin erilaisin keinoin. Eräät jäteasemat ovat pyrkineet ratkaisemaan ongelman perimällä kolminkertaisen jätemaksun yli 20 % hyödyntämiskelpoista jätettä sisältävistä kaatopaikkakuormista. (Jäteopas, Porin Hangassuo) Tehokkain tapa vähentää sekajätteeseen päätyvän hyödynnettävän jakeen osuutta on kuitenkin syntypaikkakohtainen lajittelu. (HSY, koostumustutkimus 2013)

3.3 Sekajätteestä erotetun kuidun hyödyntämisen rajoitteista

Suurimmat haasteet kierrätyskuidun käytölle asettavat käytännössä kolme eri tekijää: raaka-aineen saatavuus, kuidun laatu sekä tuotteen lujuusominaisuudet. (Paperonline 2014) Sekajätteestä erotetun kuidun käyttökohteet ovat samat kuin kierrätyskuidun, joten myös vaatimukset ovat samat. Tämän lisäksi sekajätteestä erotettu kuitu on mikrobikontaminaatioissa sen sisältämän biojätteen vuoksi, joten riittävän puhtauden saaminen lopputuotteeseen on varmistettava.

Merkittäväksi ongelmaksi kierrätetyn kuidun hyötykäytössä uusissa tuotteissa on sen fysikaalisten ja optisten ominaisuuksien heikkous. Kuitujakeen fraktioinnilla aikaansaadaan korkeampi-arvoista raaka-ainetta ja erilaisten käyttökohteiden määrä lisääntyy. (Scott & Abubakr 1994)

3.3.1 Kuitujakeen erilleen lajittelu yhdyskuntajätteestä

Sekajätteen heterogeenisen luonteen vuoksi erillinen fraktiointivaihe on tarpeen, jotta orgaaninen aines saadaan tehokkaasti hyödynnettyä. Raaka-aineen fraktiointi voidaan tehdä keräyksen yhteydessä ns. syntypaikkalajitteluna tai myöhemmässä vaiheessa jätteenkäsittelylaitoksessa. (Rättö *et al.* 2009) Sekajätteen sisältämä aines vaihtelee riippuen paikallisista jätehuoltomääräyksistä sekä asumismuodosta, minkä lisäksi ihmisten kulutustottumukset muokkaavat sekajäteastian sisältöä huomattavasti. (HSY, koostumustutkimus 2013)

Sekajätteen mukana olevan kuituaineksen talteenotto on mahdollista lajittelemalla jäte optisesti ja/tai mekaanisesti jätteenkäsittelylaitoksissa. Eräissä mekaanisen erotuksen sovelluksessa jäte murskataan pieneen, kullekin materiaalille ominaiseen palakokoon, minkä jälkeen seulomalla eri materiaalit päätyvät eri jakeisiin, jolloin ne saadaan erotettua toisistaan. On huomattava, ettei menetelmä ole kovin selektiivinen, eikä siksi teollisesti järkevä. (Rintala 2013) Materiaalinkäsittelylaitoksissa (MRF's) jätettä lajitellaan esimerkiksi nousevilla kuljettimilla painovoimaa hyödyntäen, tehokkaiden magneettien avulla, erilaisilla tärstimillä ja seuloilla sekä lopuksi manuaalisesti, jolloin hyvin tehokkaasti saadaan eri komponentit eroteltua. (UPM 2013). Optiset lajittelumenetelmät kierrätyskuidulla perustuvat paperilajien värieroihin, kiiltoon ja esimerkiksi ligniinin tunnistamiseen. On hyvin selvää, että nämä menetelmät ovat hyvin selektiivisiä kyeten tunnistamaan ainoastaan yhden paperilaadun kerrallaan. Rahman

tutkimusryhmineen (2009) kehittivät tietokonenäköön perustuvan menetelmän, millä helposti voidaan tunnistaa useita eri paperilaatuja. Kuvankäsittelyn avulla sekä valkoinen paperi, sanomalehtipaperi sekä kierrätyskartonki saadaan hyvin eroteltua kierrätyskuituraaka-aineesta. (Rahman *et al.* 2009)

Näkyvän valon aallonpituuden alueella tapahtuvan optisen erottelun hankaluutena on sekajätteen likaisuus, jolloin värierot eivät ole niin selviä, ja eri kuitulaadut sekoittuvat. Tehokkaaksi lajittelutekniikaksi on osoittautunut NIR-spektroskopia (Near Infra-Red), joka perustuu tietyn ei-näkyvän aallonpituuden valon absorboitumiseen tai heijastumiseen erilaisista materiaaleista. NIR-teknologia on mahdollista yhdistää näkyvän valon aallonpituuden detektoriin. Jätteen lajitteluun suunniteltujen laitteistojen syötön käsittelytehokkuus on hyvä ja lajittelun tarkkuuttakin voidaan parantaa uudelleensyöttämällä jäte lajittimelle. (Tomra Sorting 2014)

3.3.2 Sekajätteen sisältämän kuidun heterogeeninen koostumus

Sekajätteeseen joutunut kuituaines on koostumukseltaan heterogeenistä. Se sisältää vaihtelevasti mekaanista ja kemiallista kuitumassaa sekä valkaistua ja valkaisematonta massaa puulajikoostumuksenkin ollessa hyvin vaihteleva. Tämän vuoksi kuituaineksesta valmistetun uusiomassan laatu ja sen ominaisuudet voivat olla hyvinkin erilaiset riippuen kulloisestakin jätekuituerästä. Iosip (2010) vertasi tutkimusryhmässään tehdyissä kokeissa kierrätyskuidun laadun vaikutusta uusiomassan ominaisuuksiin. Tutkimuksessa selvisi, että jo pienetkin määrät (<5 %) ruskeaa pakkauspaperia tai pahvia graafisen paperin seassa uusiomassassa aikaansaavat merkittävän vaikutuksen massan vaaleuteen. Pakkausmateriaalin lisäys paitsi laskee vaaleutta, se myös lisää likapilkkujen määrää massassa ja huonontaa visuaalista ilmettä huonosti hajonneen pahvin jäädessä kuitukimpuiksi ja fleikeiksi valmiiseen massaan. Vastaavasti samassa tutkimuksessa osoitettiin myös vetolujuuden heikentyminen graafisen paperin määrän lisääntyessä pakkausmateriaalimassassa. (Iosip *et al.* 2010)

3.3.3 Kosteuden vaikutukset

Sekajäte sisältää aina vaihtelevan määrän biojätettä, mikä nostaa jätteen kosteusprosenttia. Biojätteen kosteus vaihtelee 60–90 % välillä. Sekajätteen polttamisen hyötysuhde ei tämän vuoksi ole kovin hyvä. Sekajätteen kuitujakeen materiaalikäyttöä silmällä pitäen kosteus on ongelma, sillä sellulolyttiset mikrobit sopivassa kosteudessa

lisääntyessään käyttävät kuidun selluloosan hiilihydraattia ravintonaan ja aikaansaavat kuidun lujuuden heikentymistä, mikä rajoittaa kuidun uudelleenkäyttöä. (Teirasvuo 2011)

3.3.4 Painoväreissä käytetyt mineraaliöljyt

Viime aikoina ovat olleet laajasti esillä myös erilaisista painoväreistä jäävät mineraaliöljyjäämät ja niiden haitallisuus. Niiden katsotaan olevan epäsoveltuvia erityisesti elintarvikekäyttöön ja tällä hetkellä elintarvikepakkauksimateriaalin raaka-aineen sisältämille mineraaliöljypitoisuuksille on asetettu hyvin tiukat rajat. Mineraaliöljyt ovat epähomogeeninen ryhmä erilaisia hiilivetyjä ja osan niistä väitetään olevan mutageenisia tai karsinogeenisiä joutuessaan elintarvikkeisiin. Euroopan elintarviketurvallisuusvirasto (European Food Safety Authority, EFSA selvittää parhaillaan mineraaliöljyjen haitallisuutta samaan aikaan, kun Saksan elintarviketurvallisuusviranomaiset (Bundesinstitut für Risikobewertung, BfR) valmistelevat lainsäädäntöä kierrätyskuidusta valmistetuille elintarvikekäyttöön joutuville pakkauksimateriaaleille. (Metsäteollisuus 2013) Biedermann ym. (2011) ovat tutkimuksissaan todenneet kierrätyskuidusta valmistetuissa pakkauksissa säilytetyissä elintarvikkeissa mineraaliöljyjen raja-arvojen ylittyvän jopa kymmenkertaisesti. Mineraaliöljyjen korvaaminen vähemmän haitallisilla yhdisteillä näyttää oleva nopein keino niiden vähentämiseen tuotteista ja viimeaikainen tutkimus keskittyikin uudentyypisten painovärien kehittämiseen esimerkiksi kasviöljystä (Sankar Roy 2007).

3.3.5 Täyteaineet

Paperinvalmistuksessa käytettävien täyteaineiden tarkoitus on parantaa opasiteettia ja vaikuttaa tuotteen paino-ominaisuuksiin. Täyteaineiden hinta on kuituraaka-ainetta edullisempi, joten sillä on vaikutus myös valmiin tuotteen hintaan. Yleisimmin käytetyt täyteaineet ovat talkki, kaoliini, kalsiumkarbonaatti eri muodoissa sekä titaanidioksidi. Viimevuosien trendinä on ollut erilaisten täyteaineiden käytön voimakas kasvu, jopa kartonkituotteissa, joilta myös vaaditaan hyvää painettavuutta. Tämä aiheuttaa ongelmia kuituraaka-aineen kierrätyksessä erityisesti huonontuneina lujuusominaisuuksina, joita joudutaan parantamaan erilaisilla sidosaineilla. Täyteaineiden suuri määrä raaka-aineessa aiheuttaa myös merkittävät häviöt esimerkiksi uusiomassan valmistuksen pesuvaiheissa sekä flotaatiossa. (Ackermann *et al.* 2009, Knowpap 2011)

Täyteainepartikkeleiden optiset ominaisuudet kierrätettynä eivät enää vastaa niiden alkuperäisiä ominaisuuksia, sillä vaaleus on matalampi niihin tarttuneiden mustepartikkeleiden vuoksi. Ongelmalliseksi täyteaineet muodostuvat myös kierrätysprosessin rejektien poltossa muodostuvina jääminä, jotka kerrostuvat lämmönvaihtimiin ja heikentävät polttolaitosten tehokkuutta ja aiheuttavat ylimääräisiä kustannuksia. (Ackermann *et al.* 2009)

3.3.6 Mikro-organismit

Jätteen käsittelyyn liittyy aina mikrobiologisia riskejä. Sekajätteen ominaisuudet, kuten kosteus sekä helppo ravinnon saanti tarjoavat lukuisille erilaisille bakteereille, homeille, sienille ja loisille erinomaiset kasvuolosuhteet (Salkinoja-Salonen 2002). Kotitalousjätteessä esiintyy eniten mikrobitoimintaa, grammassa kotitalousjätettä voi tutkitusti olla mikrobeja 10^8 - 10^9 CFU (colony forming unit) (Ajanko *et al.* 2005). Pilaantuneista elintarvikkeista erittyy hyvin usein mikrobitoroksiineja, jotka voivat olla hengitettynä ihmisille vahingollisia. Toksiinien myrkyllisyysaste vaihtelee. Jätteen sisältämästä biohajoavasta aineksesta suuri osa on hiilihydraattipitoista kartonkia ja paperia, jolloin myös homeet ja sienet löytävät helposti kasvualustan. Homesienimyrkkyjä eli mykotoksiineja erittyy tiettyjen kantojen aineenvaihduntatuotteina ja niille on mahdollista altistua hengityksen ja suun lisäksi myös ihon kautta. (Salkinoja-Salonen 2002) Elintarvikekäyttöön ei kierrätyskuidusta valmistetun pahvin katsota soveltuvan ollenkaan, eivätkä jätteestä erotetun kuidun käyttösovellukset myöskään voi olla elintarviketeollisuudessa korkeiden hygieenisyyden ja puhtausvaatimusten vuoksi.

Työhygieeniset tekijät sekajätteen käsittelyssä sekä sen hyödyntämisessä ovat merkittäviä haasteita jatkoprosesseja suunniteltaessa. Vakavimmat altistajat ovat varmasti biologisia, sillä jätteen seassa on lukuisia mikrobeja, jotka allergisoivat, tuottavat endotoksiineja ja aiheuttavat erilaisia tauteja. (Ajanko *et al.* 2005)

4 JÄTEKUIDUN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET

4.1 Yhdyskuntajätteen prosessoiminen materiaalinkäsittelylaitoksessa

Materiaalinkäsittelylaitoksissa eli MRF –laitoksissa (materials recovery facility) on mahdollista käsitellä yhdyskuntajätettä joko täysin lajittelemattomana tai jo lajiteltuna. Täysin lajittelemattoman yhdyskuntajätteen käsittelyn tarkoituksena on erotella jätteestä kaikki hyödynnettävissä oleva ja muuttaa jäte arvokkaaksi raaka-aineeksi jatkoprosesseihin asiakkaille.

Isossa-Britanniassa sijaitsevalla UPM Shottonin paperitehtaalla käsitellään vuositasolla 640 000 tonnia keräyspaperia. Vuonna 2011 tehtaan yhteyteen avattu materiaalin kierrätys-/lajittelulaitos mahdollistaa kotitalousjätteen tehokkaan materiaalikäytön, jolloin lähes puolet lajitteluun tulevasta kierrätysmateriaalista ohjautuu uudelleen paperin raaka-aineeksi. Pääosin sanoma- ja aikakauslehtiä sisältävää kuitujaetta syntyy lajittelun tuloksena 120 000 tonnia vuosittain hyödynnettäväksi sanomalehtipaperin tuotannon raaka-aineena. (UPM 2013)

Urban Mill –tehdaskonsepti Metsolta

Metso oyj kehitti jo yli 10 vuotta sitten Urban Mill –pientehdaskonseptia, jolla saataisiin jätevirrat tehokkaasti hyödynnettyä esimerkiksi uusiopaperin valmistuksessa. Konseptin periaate oli yhdistää materiaalin tuottajat, toimittajat, asiakas sekä jätepalvelun tarjoajat kokonaisuudeksi, missä he muodostaisivat toisiaan hyödyntävän toimintaketjun. Tavoitteena oli löytää ratkaisuja kaatopaikkakuorman keventämiseksi tehostamalla materiaalihyödyntämistä. Kustannusten arvioitiin Urban Mill –konseptin käyttöönotolla pienentyvän jätteiden käsittelyn, energian tuoton sekä uusiopaperinvalmistuksen osalta ja kannattavuuslaskelmien mukaan investointi olisi kannattava ainakin pehmopapereiden ja lainereiden valmistuksen osalta.

Projekti oli osa Tekesin Jätteiden Energiakäyttö-hanketta ja on ollut Metson osalta käynnissä vuosina 1999–2001. Teknologiankehitysprojektin tuloksena oli, että Urban Mill -konseptin avulla yhdyskuntien jätevirtoja voitaisiin kiinteän jätteen osalta tehokkaammin hyödyntää integroidun paperinvalmistustehtaan energiantuotantoon samalla, kun erotetun kuitujakeen hyödyntäminen toteutuisi raaka-ainekäytön kautta. Konsepti oli kilpailukykyinen, mutta Suomessa kaatopaikalle joutuvan kuidun määrä

riittäisi ainoastaan 1-2 pienpaperitehtaaseen. Ulkomaiden markkinat olisi saatava auki myös. (Metso oyj 2001, Nikula 2002, Metso oyj/ Ristola 1999) Tällä konseptilla saataisiin hyötyjä sekä ympäristönäkökulmasta katsottuna että taloudellisesti, mutta teollisen mittakaavan sovellusta ei ole kehitteillä ja teknologiankehitystä ei ole jatkettu.

Materiaalinkäsittelylaitoksia suunnitteilla myös Suomeen

Lassila & Tikanoja on lehdistötiedotteessaan 28.8.2013 ilmoittanut suunnittelevansa kotitalouksien syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä ja teollisuuden sivuvirtoja hyödyntävän materiaalinkäsittelylaitoksen rakentamista Uuteenkaupunkiin kaatopaikan yhteyteen. Uuden materiaalinkäsittelylaitoksen tavoite on jätehierarkian mukaisesti hyödyntää jätteet ensijaisesti materiaalina, mutta myös kierrättämällä sekä polttamalla energiaksi. Käsittelylaitos ottaisi vastaan lähiseudun yhdyskuntajätteen ja erilaisten lietteiden ja tuhkien lisäksi myös rakennusjätettä ja pilaantuneita maa-aineksia sekä ruoppausmassoja. (Lassila & Tikanoja 2014)

Alueella on jo kaatopaikkakaasun talteenotosta ja biokaasun valmistuksesta biojätteestä vastaava yritys ja sen lisäksi elintarviketeollisuuden sivuvirtojen käsittelyyn biodieselin valmistuksessa erikoistunut yritys. Hankkeen tavoitteena on luoda alueelle vahva biotalousverkosto, minkä avulla Uudenkaupungin hiilineutraaliutta kehitettäisiin yhteistyössä eri toimijoiden kanssa. Lehtiartikkelista tai hankkeen YVA-arviointiohjelmasta ei kuitenkaan käy ilmi mihin lajittelematon sekajäte päättyy. Ei tiedetä, onko sitä huomioitu laitoksen käsittelylinjoissa, vai onko toiminnan lähtökohtana ajatus, että taloudet lajittelevat kaiken jätteensä vuoteen 2016 mennessä. Asumisen jätteiden vastaanotto lajiteltunakin on mukana hankkeen laajimmassa ja innovatiivisimmassa toteutumisvaihtoehdossa. Suunnitelman mukaan vuonna 2016 toimintansa käynnistävä materiaalinkäsittelylaitos on varsin mielenkiintoinen yksityisen toiminnanharjoittajan kehittämä malli, minkä avulla alueellisia materiaalien uudelleenkäyttö- ja kierrätysmahdollisuuksia voidaan parantaa jätesuunnitelmaa mukaillen. (Lassila & Tikanoja 2014)

Ekokem Oyj on myös parhaillaan kehittämässä Turun Seudun jätehuollon kanssa yhteistyössä laitosratkaisua, jonka avulla parannettaisiin yhdyskuntajätteen materiaalitehokkuutta. Ekojalostamo tulisi olemaan kierrätyslaitoskonsepti, minkä tavoitteena on mekaanisen tai muun esikäsittelyn avulla erottaa kaikki hyödynnettävissä oleva kierrätyskelpoinen materiaali jatkokäyttöä varten. Ekojalostamon päätuotteita

tulisivat olemaan uusioraaka-aineet kuten metalli-, muovi- ja kuitujakeet sekä biokaasu ja myös maanparannuskomposti. (TSJ verkkojulkaisu 2012)

Ensimmäisen Ekojalostamon kapasiteetin on arvioitu olevan noin 150 000 tonnia jätettä vuodessa. Ekojalostamokonseptin avulla jätteiden kierrätys ja hyötykäyttöaste saataisiin nostettua korkeammaksi kuin syntypaikkalajittelulla (TSJ verkkojulkaisu 2012)

4.2 Kierrätyskuidun käyttösovelluksia

Keräyspaperista valmistettavat uudet tuotteet ovat kuidun ominaisuuksista riippuen pääasiassa sanomalehti-, luettelo- pehmo- tai laminaattipaperia tai erilaisia kartonkeja. Siistauskelpoinen paperi päättyy pehmo- tai painopaperiksi ja ruskeat pakkauspaperilajikkeet kelpaavat esimerkiksi hylsy- tai aaltokartonkituotteisiin.

Keräyspaperi raaka-aineena sanomalehtipaperin tuotannossa

Keräyskuitua käytetään raaka-aineena paperiteollisuudessa, kun sen saatavuus on hyvä. Suomessa keräyspaperin talteenotto on Euroopan huippuluokkaa, noin 70 %. Lähes kaikki kierrätyskuitu käytetään paperinvalmistusprosesseissa, mutta silti Suomessa hyödyntämistä on hyvin pieni. Keräyskuidun osuus on vain noin 5 % paperi- ja kartonkiteollisuuden raaka-aineesta. Tämä johtuu siitä, että paperin vienti ulkomaille on merkittävää, ja kierrätyskuitu talteenotetaan siellä uudelleenkäyttöä varten. (Metsäteollisuus 2013, Paperonline 2014)

Stora Enson tehdas Belgiassa, Langerbrugessa, käyttää raaka-aineenaan 100 % keräyspaperia. Reilu kymmenen vuotta sitten käyttöön otettu sanomalehtipaperia sekä SC-paperia valmistava uusi, tuotantokapasiteetiltaan noin 400 000 tonnin paperikonelinja kerää kaiken raaka-aineensa tehtaan lähiseudulta. (Stora Enso 2013)

Suomessa syntyvästä yhdyskuntajätteestä jopa 10–20 % on hyödyntämiskelpoista paperia ja pahvia. Keräyspaperia ja sekajätteestä erotettua kuitua olisi siten optimitilanteessa käytettävissä vuositasolla 270 000–540 000 tonnia. Vertailun vuoksi todetaan, että UPM Shottonin tehdas käsittelee 640 000 tonnia kierrätyspaperia vuodessa ja tuottaa siitä noin 500 000 tonnia sanomalehtipaperia. Paperinvalmistuksessaan Shotton käyttää 120 000 tonnia yhdyskuntajätteestä lajiteltua jätekuitua, mikä on viidesosa tarvittavasta uusiokuituraaka-aineesta. Loppuosa on syntypaikkalajiteltua kierrätyskuitua. (Rättö 2009, Tilastokeskus 2012, UPM 2013)

Jos sekajätteestä erotetun kuidun laatuominaisuudet ovat hyvät, sen määrä riittäisi myös Suomessa korvaamaan osan kuituraaka-aineesta esimerkiksi kartonkiteollisuudessa.

Keräyspaperista ja -kartongista hylsykartonkia

Kierrätyskelpoisen pakkauskartongin hyötykäyttö Suomessa on 2000 –luvulla keskittynyt suurelta osin Stora Enso konserniin kuuluviin Corenso Varkaus Recycling –laitokseen sekä Porin kartonkitehtaaseen. Vuositasolla erilaisten hyödynnettävien kierrätyskuitujen määrä on ollut yhteensä näillä tehtailla noin 200 000 tonnia, mistä suurin osa (70 %) on peräisin kaupoista ja teollisuudesta. Suoraan kuluttajilta kerättyä kartonkiainesta on noin 20 % kokonaismäärästä. (Saarinen 2009)

Joulukuussa 2008 Varkauden laitos kuitenkin suljettiin kannattamattomana. Syynä lopettamiseen oli viennin kustannukset, joiden osuus saattoi kohota 20–30 prosenttiin kokonaiskustannuksista. Vaikka Varkauden laitoksen käyttämä teknologia oli huippuluokkaa, viennistä riippuvaisen tehtaan sijainti oli haastavan kaukana. Varkauden tehtaan kilpailuetuna oli sen monipuolisuus. Aaltopahvin lisäksi tehdas pystyi hyödyntämään myös monimateriaalipakkaukset. Nestepakkauskartongin sisältämän puukuituaineksen hyödyntämisen lisäksi oli mahdollista erottaa alumiini metalliteollisuuden sovelluksiin ja muovi energiakäyttöön. (Mroueh *et al.* 2007, Saarinen 2009)

Varkauden tehtaan sulkemisen jälkeen kierrätyskuitutoiminta keskitettiin Porin kartonkilinjalle, mutta Varkaudessa on jatkettu tutkimus- ja kehitystyötä kierrätyskuidun loppukäyttöä silmälläpitäen. Yksi tutkimuksen kohde on mm. keräyskuidun lajittelun tehostaminen käyttökohteiden monipuolistamiseksi. Ongelmana eivät niinkään ole kierrätyskuitumateriaalien käsittelyteknologiat ja niiden kehitys, vaan hyötykäytöstä aiheutuvat kustannukset. Investointien kannattavuutta on vaikea arvioida, koska tulevaisuuden trendejä on vaikea ennustaa. (Saarinen 2009) Tällä hetkellä kuitenkin näyttää siltä, että kierrätyskuidun arvo on nousussa ja paperiteollisuudenkin tulevaisuus tulee kasvavassa määrin keskittymään erilaisiin kierrätyskuitusovelluksiin.

Kierrätyskuidusta rakennus- ja lämmöneristeitä

Suomessa toimivista rakennusalan yrityksistä useat käyttävät jo keräyspaperia erilaisten rakennus- ja lämmöneristeiden valmistukseen. VTT:n tutkimuksessa *Uusien jätteenkäsittelykonseptien mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä* vertailtiin myös puukuitumateriaalille Suomessa käytössä olevia jätteenkäsittely-

konsepteja painottaen ratkaisuja, joissa jätemateriaalista saadaan jatkojalostettua kokonaan uusi tuote. Yksi tällainen on puukuitulevy, jota voi käyttää lämmöneristemateriaalina tai tuulensuojalevynä. (Mroueh *et al.* 2007) Puukuitueriste valmistetaan happivalkaistusta mäntysellusta ja siihen karboksimeetyyliselluloosalla (CMC) aikaansaatu verkkomainen rakenne luo tehokkaasti lämpöä eristävän ilmatilan. Paloturvallisuus sekä suoja biodegradaatiota vastaan aikaansaadaan boorikäsittelyllä.

Kierrätyspaperipohjaista puhallusselluvillaa käytetään eristemateriaalina. Esimerkiksi Termex -kauppanimellä markkinoitava selluvilla koostuu valikoidusta sanomalehtipaperista, magnesiumsulfaatista sekä boorihaposta ja sitä voidaan hyödyntää kaikessa rakentamisessa lämmöneristeenä sekä hirsitalojen lisälämmöneristeenä. Lukuisat valmistajat ovat hyödyntäneet keräyskuidun mahdollisuudet hiilijalanjäljen pienentämisessä sekä energiankulutuksen vähentämisessä. Lisäksi puukuidun erinomaiset ominaisuudet kosteudensiirrosta sekä hengittävyudessa säilyvät kierrätettynäkin, joka puoltaa jätekuidun uudelleenkäyttöä eristemateriaaleissa. (Termex Oy 2013, Ekovilla Oy 2014)

Kierrätyskuidun käyttö rakennuslevyissä tai muissa rakennemateriaaleissa

Saksalainen Xella International on tuonut markkinoille uudenlaisen Fermacell-kuitukipsilevyn, joka sisältää 80 % kipsiä ja 20 % kierrätettyä paperikuitua. Tuote on ekologinen ja selvästi kestävämpi ja jäykempi kuin perinteinen kipsilevy, mutta myös hinnaltaan 30 prosenttia edullisempi. (Fermacell 2013). Stora Enson patentoimaa 100 % kierrätyskuitua olevaa Re-Board -rakennellevyä voi käyttää kevyissä rakenteissa, kuten messuilla, koska se on helppo kuljettaa ja muotoilla halutuksi. Sen pintaan voi myös tulostaa. Käytön jälkeen tuote hävitetään pahvinkeräykseen. (Stora Enso 2014)

Kierrätetyn kuidun hyötykäyttö energiana

Fibrefuel on jätealan toimijoiden kanssa yhteistyön tuloksena syntynyt uuden ajan pellettituote, mikä valmistetaan Shottonin tehtaan keräyspaperin käsittelyprosesseissa syntyvän jätteen paperikuitujakeesta ja sen avulla tuotetaan energiaa tehtaan omaan käyttöön. Tällä hetkellä tehtaan omasta jätteestä 90 % kierrätetään tai ohjataan uusiokäyttöön, mikä tarkoittaa, että UPM Shotton on edelläkävijä raaka-aineen materiaalitehokkuudessa. (UPM 2013)

4.3 Sekajätteestä erotetun kuidun jalostaminen biopolttoaineiksi

Ympäristöministeriön ympäristöklusterin tutkimusohjelman projektissa *Yhdyskuntajätteiden hyödyntäminen biojalostamossa* selvitettiin, kuinka yhdyskuntajätteestä erotettua hiilihydraattipitoista fraktiota voitaisiin hyödyntää esimerkiksi biopolttoaineiden valmistuksessa. VTT:n (2009) julkaiseman selvitystyön tuloksissa esitetään, että Suomessa syntyvästä sekajätteestä voisi tuottaa laskennallisesti 260 000 tonnia etanolia. Hiilihydraattikoostumus on optimaalinen, mutta ongelman muodostavat sekajätteen muut komponentit sekä epätasalaatuinen koostumus eri jakeiden kesken. (Rättö *et al.* 2009)

Lignoselluloosabiomassojen jalostaminen biopolttoaineiksi, kuten bioetanoliksi ja biokaasuksi on houkuttelevaa, mutta vaikeutena yleensä on tiiviin ligniinkerroksen suojassa olevan selluloosan hydrolysointi sokereiksi. Sekajätteen seassa olevasta kuitumaisesta aineksestä suuri osa on kemiallista, valkaistua massaa, jossa on hyvin vähän ligniiniä, mikä tekee sekajätteen seassa olevasta kuidusta helpommin käsiteltävän. (Dale & Musgrove 2004)

Sekajätteestä erotettu kuitu voisi tarjota taloudellisesti kannattavan raaka-ainepohjan esimerkiksi bioetanolin valmistukseen. Bioetanolin valmistuksen haasteena on ollut mm. lignoselluloosabiomassojen saatavuus, varastointi ja keräys sekä erilaiset esikäsittelymenetelmät, joiden avulla voidaan varmistaa hydrolysoinnin onnistuminen. Sekajätteelle on olemassa oleva toimiva keräys- ja varastointisysteemi, jota olisi helppo hyödyntää pahvi- ja paperikuidun saatavuuden varmistuksessa. Erityisen kannattavaksi sekajätteestä erotetun kuidun hyödyntäminen saataisiin fraktioimalla se hyvälaatuiseen pitkäkuitujakeeseen ja heikompilaatuiseen lyhyeen kuituun ja hienoainekseen. Pitkä kuitu olisi helposti kierrätettävissä parempien lujuusominaisuuksiensa vuoksi eri paperi- ja kartonkitekiteollisuuden sovelluksiin, kun taas lyhytkuitujae voisi ohjautua hydrolysointiin ja bioetanolifermentointiin. (Dale & Musgrove 2004)

5 KUIDUN EROTUS- JA PUHDISTUSTEKNIIKAT

Erilaisia lajittelutekniikoita kuitumassojen prosessoinnissa tutkitaan laajasti paperin- ja pahvinvalmistuksen tuotantokulujen noustessa sekä kilpailutilanteen yhä kiristyessä. Lajittelun tehtävänä on poistaa puukuitususpensiosta kaikki epäpuhtaudet. Lajittelu voi perustua partikkelin kokoon, muotoon tai ominaispainoon, mutta myös kuidun pituuteen. (Gustafsson *et al.* 1983) Kuidun pituuteen perustuva erottelu on tarpeen erityisesti uusiomassan lajittelussa, missä kuidun pituus lyhenee merkittävästi jokaisen uudelleenjauhatuksen jälkeen. Noin 3-5 kierrätyskerran jälkeen kuidun pituus on yleensä niin lyhyttä, että lujuusominaisuudet kärsivät. Tämän jälkeen ensikuidun lisääminen kuitumassan sekaan on välttämätöntä lujuuden ylläpitämiseksi.

Kuitumassan fraktioinnilla voidaan alentavasti vaikuttaa paperin ja kartongin valmistuskustannuksiin. Kuitujen fraktioinnin etuina ovat mm. energian kulutuksen pieneneminen sekä kemikaalien käytön väheneminen jatkojalostusprosesseissa. (Niinimäki *et al.* 2007) Kuidut voidaan lajittelun ja pyörrepuhdistuksen avulla selektiivisesti jaotella eri jakeisiin sovelluskohteiden vaatimusten mukaisesti, jolloin säästetään esimerkiksi raaka-ainekustannuksissa. (Niinimäki *et al.* 2007, Ämmälä 2001) Lisäksi on mahdollista erilaisia kuitujakeita yhdistelemällä räätälöidä seos, jolla on halutunlaiset ominaisuudet. (Scott & Abubakr 1994)

Teollisessa käytössä sekä pilot -mittakaavassa varteenotettavia menetelmiä kuitujen erotteluun ja puhdistukseen ovat siis erilaiset kuidun pituuteen perustuvat lajittelut sekä pyörrepuhdistus. Kuitumassan likapartikkeleiden, kuten musteen sekä tahmojen poistaminen massasta tehdään tavallisimmin vaahdotussiistauksella. Laboratorio-mittakaavassa lajiteltua kuitumassaa voidaan analysoida jakamalla sitä eri fraktioihin esimerkiksi putkivirtausfraktioinnin tai elutrioinnin avulla.

5.1 Kuidun pituuteen perustuva lajittelu

5.1.1 Karkea lajittelu täryseulalla

Seula lajittelee näytteen reiällisen tai raollisen seulalevyn läpi. Karkean lajittelun kuitumassalle voi tehdä esimerkiksi tasomaisella täryseulalla, jolloin sopivan seulakoon valintaan vaikuttavat mm. lähtömassan partikkelikoko, kapasiteettitarve sekä

jatkokäytön partikkelikoon vaatimukset. Karkea lajittelu säästää jatkoprosesseissa tapahtuvaa laitteiden kulumista sekä estää tukkeutumia, koska näytteen partikkelikokojakauma on tasalaatuinen ja partikkelikoko pienempi. (Gustafsson *et al.* 1983)

5.1.2 Painesihdit

Kuidun pituuteen perustuvaa lajittelua tehdään yleisesti painesihdeillä. Menetelmä soveltuu hyvin karkeaa lajittelua seuraavaksi vaiheeksi. Kuitumassaa ajetaan paineistettuna sihdin läpi, jolloin akseptina taiteenotettavat pienet kuidut läpäisevät sihdin reiät tai raot ja sihdin rejektiin jäävät suurikokoiset tikut ja kuitukimput. Erotuskykyyn vaikuttavia tekijöitä ovat mm. reikäkoko sekä rejektisuhde. Menetelmä on helppo ja luotettava ja kokonsa nähden laitteen suorituskapasiteetti on hyvä. (Niinimäki *et al.* 2007 Gustafsson *et al.* 1983, Jokinen 2007)

Painesihtti on mahdollista asentaa sarjaan pyörrepuhdistimen kanssa, sillä syöttöpaine on merkityksetön sihdin toiminnan kannalta. Sen sijaan akseptipuolen paineen on oltava riittävän suuri tukkeutumisen ehkäisemiseksi. (Gustafsson *et al.* 1983)

5.1.3 Putkivirtausfraktiointi

Perinteisen Bauer McNett -analyysin rinnalle on tullut nopea ja luotettava menetelmä kuitumassan eri fraktioiden massaosuuksien määrittämiseksi. Putkivirtausfraktiointi (Fracon, Metso Automation) on hyvin selektiivinen menetelmä, jossa periaatteena on erotella kuidut kokonsa mukaan. Erottelu tapahtuu pääasiassa pituuden perusteella ja erotusskaala on 1–5000 µm. (Laitinen 2011, Niinimäki *et al.* 2007)

Putkivirtausfraktiointi tapahtuu aksiaalisessa virtauksessa, veden toimiessa eluenttina. Syötön turbulenttisuus aiheuttaa pienten partikkeleiden ajautumisen seinämien lähelle, missä virtaus on kaikkein hitainta. Isot partikkelit taasen kulkeutuvat todennäköisemmin takaisin virtauksen keskiosiin jatkaen matkaa virrassa. Suurimmat kuidut konsentroituvat siten virtauksen etuosaan, jolloin ne tulevat ensimmäisenä ulos putken päästä. (Laitinen 2011) Fraktioinnin edellytyksenä putkivirtaussysteemissä on poikkeama laminaarisesta virtauksesta. Re-luvun (Reynolds) tulee olla turbulenttisella alueella, optimaalisin alue toiminnalle on Re 1000–10000.

Kuitufraktioinnin avulla saadaan selville kiinnostavimpana tuloksena pitkän kuidun osuus, millä on merkitys jatkokäytön kannalta. Arkin lujuusominaisuudet ovat paremmat, kun pitkän kuidun osuus on suurempi. (Abubakr *et al.* 1994) Jätteestä erotetun kuidun hyödyntämisen ongelma on myös raaka-aineen laadulliset vaihtelut. Kierrätyskuidusta valmistetun kartongin erottaminen sekajätteestä on kannattavaa vain, jos sen kuidun laatu on yhä riittävän hyvä.

5.2 Tiheyteen tai pinta-alaan perustuva puhdistus

5.2.1 Elutriaatio

Elutriaatio on yksinkertainen erotusmenetelmä, joka on kehitetty osaksi raaka-aineen hyödyntämispotentiaalin selvitystä. Elutriaation avulla tutkittavasta raaka-aineesta saadaan erotettua karkea aines, kuituaines sekä ultrahienoaines toisistaan. Raaka-ainevirta ajetaan tunnetussa, hyvin matalassa sakeudessa elutriointisuppilon alaosaan sisään, jolloin jatkoanalyysyjä häiritsevää karkeaa ainesta kertyy suppilon alaosaan. Tällaista karkeaa jaetta on esimerkiksi hiekka. Ultrahienoaines erotetaan suppilon ylivirtauksesta suodattamalla. Elutriaation jälkeen talteenotetusta kuituaineksesta voidaan edelleen tehdä kromatografinen erotus, jolla selvitetään erilaisten kuitujakeiden määrä. Kuitujakeita on yhteensä neljä; pitkä kuitu, lyhyt kuitu, kuituflokkit sekä hienoaine. (Mäkinen *et al.* 2012, Mäkinen 2013)

Pitkä- sekä lyhytkuitujae sisältävät pääasiassa kuitua. Hienoaineksessa on täyteaineita ja pieniä kuitupartikkeleita. Kuituflokkit ovat suurehkoja kuitukimppujen muodostamia hiutaleita tai lastuja. Vaikka flokit ovat kooltansa suuria, ovat ne keveitä. (Mäkinen *et al.* 2012)

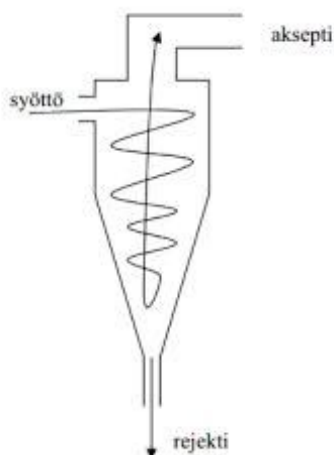
5.2.2 Pyörrepuhdistus

Pyörrepuhdistus erottaa massasta raskaat partikkelit perustuen ominaispinta-alaan ja tiheyteen. Tavoitteena on erottaa massasta hiekka, niitit ja muut partikkelit, jotka aiheuttavat ongelmia jauhimilla tai sihdeillä. (Mauno 2010) Toiminta perustuu nesteeseen syöttövirtauksen aiheuttamaan pyörivään liikkeeseen ja siitä aiheutuvaan sentrifugaaliseen keskipakovoimaan. Kuvasta 5 nähdään periaatteellinen perinteisen hydrosyklonin toiminta. Partikkelit, joiden tiheys on kuitua suurempi, joutuvat

syöttövirrasta syklonin ulkokehälle ja laskeutuvat alas rejektipäähän. Syklonin keskelle muodostuu virta ylöspäin, joka kuljettaa kevyet partikkelit ylös akseptivirtaan. (Jokinen 2007:38–40, Mauno 2010)

Erotettavan kuitususpension ominaisuuksien on tutkittu vaikuttavan erotuksen selektiivisyyteen siten, että vahva kuituverkosto huononsi hiekan sekä kuitujen erottumista hydrosyklonissa. Suuri hienoaineksen määrä vaikeutti kaasujen poistumista. (Jokinen 2007). Kraipechin *et al.* (2006) tutkimuksissa on mallinnettu hydrosyklonin toimintaa virtauslaskennan avulla, tavoitteenaan parempi ennustettavuus erotukselle. Virtausilmiöiden monimuotoisuus ja partikkeleiden väliset vuorovaikutukset osoittautuivat tekijöiksi, joiden merkittävyyttä ei osata arvioida kuin käytännön kokeiden ja niiden tuoman tietämyksen kautta. (ks. Jokinen 2007:39)

Hydrosyklonille on tutkimusten (Bergström 2006) perusteella ehdotettu kokonaan uudenlaista muotoilua, sillä on havaittu, että virtauksesta syntyvä radiaalinen kiihtyvyys ja leikkausjännitys säilyisivät tällöin suurissakin konsentraatioissa paremmin kuin perinteisessä hydrosyklonissa. (Bergström 2006)



Kuva 5. Yksinkertaistettu kaaviokuva hydrosyklonin toimintaperiaatteesta

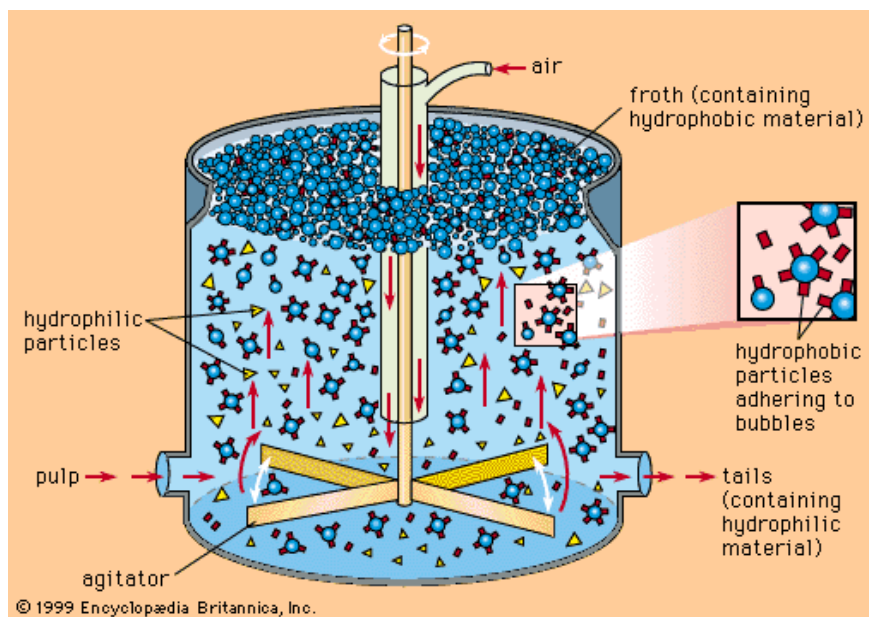
5.3 Partikkelien ominaisuuksiin perustuva puhdistus

5.3.1 Vaahdotussiistaus eli flotaatio

Vaahdotus eli flotaatio on tavallisin siistausyksikköprosessi. Se perustuu lika-aineiden sekä painovärien hydrofobisuuteen. Kun kuitumassaan ohjataan ilmaa, hydrofobiset

hiukkaset, kuten painoväri, tarttuvat nousevaan ilmakuplaan ja poistuvat syntyvässä vaahdossa ylivirtauksena hydrofiilisten kuitujen jäädessä massaun. (Mauno 2010) Vaahdon mukana joutuu myös paljon kuitumaista hienoainesta ja jonkin verran kuitua ulos mikä heikentää menetelmän materiaalitehokkuutta. Tätä voidaan estää ottamalla rejektivirta talteen ja kierrättämällä se uudelleen siistattavaksi. (Mäkinen 2013, Kärkkö 2012)

Kuvassa 6 on esitetty periaatekuva flotaatiokennosta ja sen toiminnasta. Vaahdotuksessa poistuu pääasiassa 50–250 µm:n kokoista hienoainesta ja täyteaineita, jolloin myös tuhkan osuus akseptijakeessa pienenee. Flotaation onnistuminen vaatii usein oikeiden fysikaalisten olosuhteiden (lämpötila, pH, sakeus) lisäksi myös vaahdotuskemikaaleja, jotka luovat edellytykset toiminnalle. Siitä huolimatta onnistunut lopputulos vaatii monivaiheisen flotaatiokennostosisysteemin, jotta massa saadaan puhdistettua tehokkaasti. (Mauno 2010)



Kuva 6. Periaatekuva flotaatiosta. Kuvassa oleviin sinisellä kuvattuihin ilmakupliin tarttuu hydrofobisia hiukkasia, kuten mustetta ja muita lika-aineita. Ilmakuplat nousevat pintaan muodostaen vaahdon, joka kerätään pois tai ylijooksutetaan. Hydrofiiliset partikkelit, kuten kuidut jäävät nesteeseen. (kuvattu keltaisella kolmioilla) (Kuva: Encyclopedia Britannica Inc. 2014)

KOKEELLINEN OSUUS

Sekajäte sisältää karkeasti arvioiden noin 10–15 % kuituainesta, mikä soveltuisi hyvin kierrätettäväksi, mutta päätyy yhä usein kuluttajilta suoraan kaatopaikattavan yhdyskuntajätteen sekaan. Sekajätteestä erotettu kuitu voisi toimia raaka-ainepohjana keräyskuidun rinnalla erilaisissa paperiteollisuuden prosesseissa sekä muissa biotalouden teknologiasovelluksissa, missä yhdistämällä jätekuitua muihin materiaaleihin voitaisiin luoda kuiduista kokonaan uusia tuotteita.

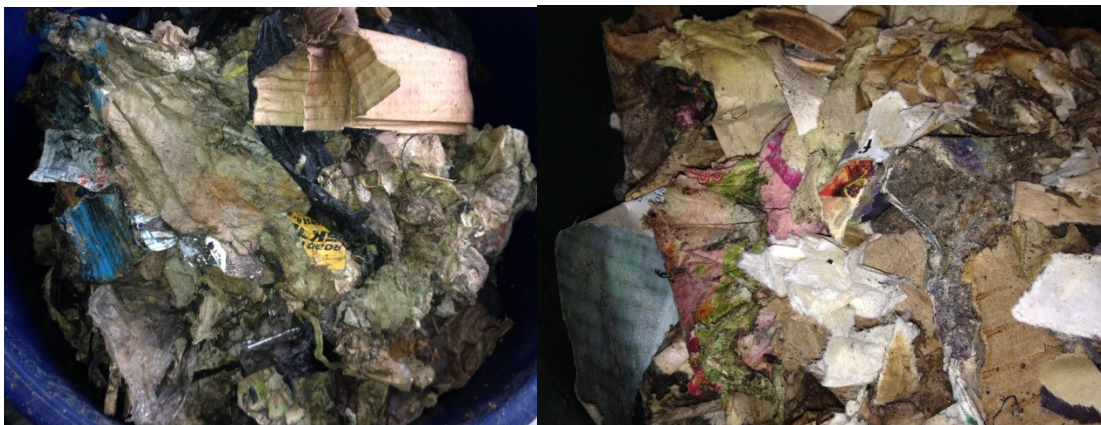
Tämän työn kokeellisen osan tarkoituksena oli selvittää sekajätteestä erilleen lajitellun kuidun hyötykäytön mahdollisuuksia selvittämällä kuidun fysikaalisia ja optisia laatuominaisuuksia sekä erilaisten prosessointimenetelmien vaikutuksia kuitumassan laatuun. Prosessointiin valittiin erilaisia perinteisiä uusiomassan puhdistus- ja lajittelumenetelmiä, joiden soveltuvuutta sekajätteestä erotetun kuidun käsittelyyn arvioitiin lukuisin erilaisin laboratorioissa tehtävin analyysein.

6 SEKAJÄTEKUIDUN TUTKIMUS

6.1 Tutkimukseen käytetty raaka-aine

Kokeelliseen osuuteen käytettiin yhdyskuntajätteestä eli sekajätteestä erotettua kuitupitoista ainesta. Kuituaine on lajittelun jälkeen säilytetty jätesäkeissä kylmähuoneessa +4 °C:ssa noin 4 kk ennen työn aloitusta. Kuitujae on vaihtelevan kokoista, hyvin kosteaa ja mikrobiologisen kontaminaation vuoksi paikoin jopa silmin havaittavassa homeessa.

Raaka-aineesta on aiemmin teetetty tutkimus, mistä selviää sen koostumus. Kuitujakeessa on mekaanista havupuumassaa (1/3) ja kemiallista/puolikemiallista havuja ja lehtipuumassaa (2/3). Puulajijakauma on monipuolinen kuitunäytteen sisältäessä sekä mäntyä, koivua että kuusta, jotka ovat peräisin erilaisista paperi- ja kartonkitekiteollisuuden tuotteista. Kuvassa 7 on kuvat kahdesta eri näyte-erästä. Silmämääräisesti arvioituna sanomalehtipaperia on hyvin paljon ja erilaisten pakkausmateriaalien määrä on myös suuri. Kuitujae on erotettu optisesti, joten seassa on paljon myös ei-kuitumaista orgaanista ja epäorgaanista ainesta.



Kuva 7. Sekajätteestä erotetun kuitujakeen koostumus on vaihteleva. Kuvissa on kahden eri sekajätenäyte-erän paperi ja pahvikuitua.

Lajittelusta saadut näyte-erät poikkesivat toisistaan kuitulajien sekä kokojakaumansa puolesta. Tutkimuksessa käytetyn raaka-aineen käsittelyssä pyrittiin näyte-erien yhdenmukaiseen käsittelyyn ja näyte-eriä myös yhdisteltiin luotettavamman tuloksen aikaansaamiseksi.

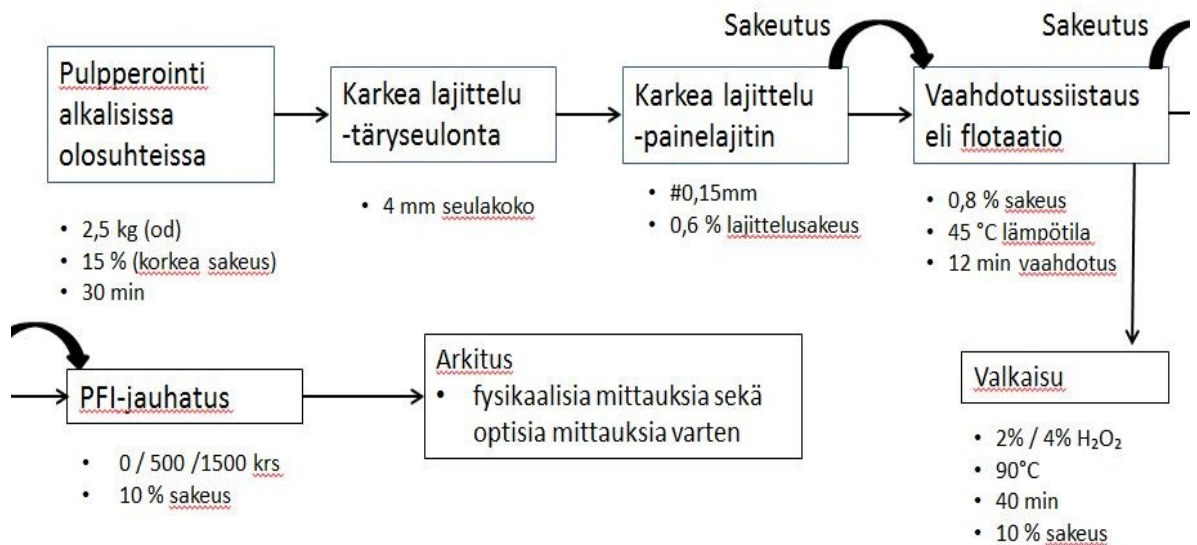
6.2 Prosessointiketjun kuvaus

Eri puhdistus- ja lajittelumenetelmien vertailun mahdollistamiseksi työhön suunniteltiin prosessiketju. Käsittely vastaa suurelta osin kierrätyskuitumassan käsittelyä. Yksikköprosesseiksi valittiin korkeasakeuspulpperointi, tarvittaessa täryseulonta, painelajittelu, flotaatiosiistaus, valkaisu sekä PFI-jauhatusvaihe. Kuvassa 8 on esitetty prosessiketjun vaiheet ja olosuhteet, joita tässä työssä käytettiin. Prosessoinnin aikana näiden vaiheiden vaikutusta kuitumassan laatuun seurattiin analysoimalla näytteiden epäpuhtauksia, kuten likapilkkuja ja tahmoja sekä tarkastelemalla optisten ominaisuuksien muutosta prosessivaiheiden edetessä. Viimeisimmästä akseptista flotaation jälkeen valmistettiin laboratorioarkit fysikaalisia sekä optisia mittauksia varten.

Korkeasakeuspulpperoinnissa käytettävillä kemikaaleilla on tarkoitus saada kuitu turpoamaan, jotta painovärit sekä epäpuhtaudet irtoaisivat helpommin. Siistauskemikaalit muokkaavat likapartikkeleiden kokojakaamaa agglomeraatiolla helpottaen jatkoprosesseja. Täryseulonnalla tehtävä lajittelu on tarpeen jos näytteeseen jää paljon kuiduttumatonta materiaalia tai esimerkiksi hajoamatonta voimapaperia. Kuituuntumattoman aineksen poistaminen kuitumassasta tehtiin painelajittimella avulla #0,150 mm rakosihdin läpi. Flotaatiossa poistettiin pienikokoista epäpuhtautta mahdollisimman vähällä kuitutappiolla. Flotaatiossa myös poistuu tehokkaasti esimerkiksi irronneita painovärejä.

Jauhatusvaihe muokkaa kuituja mekaanisesti rasittamalla, jolloin primääriseinän ligniini irtoaa ja kuidusta tulee taipuisampi. Jauhatuksen tarkoituksena on parantaa kuitujen sitoutuvuutta ja näin ollen myös lujuutta. Oletuksena kuitenkin on, ettei sekajätteestä erotettu kuitu kestä jauhatusta yhtä hyvin kuin normaali kierrätyskuitu, joten päätettiin tarvittaessa poiketa standardista pienentämällä jauhatuskierroksia.

Valkaisu tehtiin ainoastaan yhdelle näyte-erälle flotaation jälkeen. Tätä näytettä ei jauhettu eikä myöskään lujuusominaisuuksia mitattu. Tarkoituksena oli ainoastaan testata valkaisun vaikutusta ja tehoa, mikä todennettiin optisilla mittauksilla.



Kuva 8. Prosessointiketjun kuvaus tutkitulle sekajätekuudulle.

6.3 Tutkimusmenetelmät

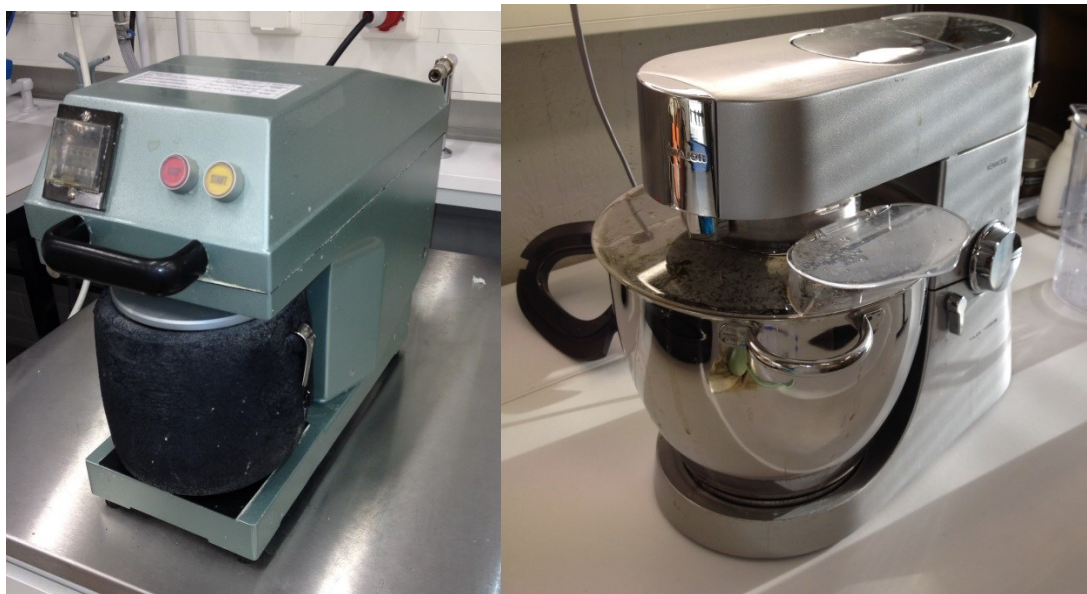
Tutkittava kuitujae oli lajiteltua, mutta sisälsi paljon näytteen käsittelyä häiritsevää suurikokoista epäpuhtautta, mikä voi jopa estää kuidun prosessoinnin. Ensimmäiseksi raaka-aineen seasta oli poistettava manuaalisesti siellä olevat karkeat epäpuhtaudet, kuten metallinkappaleet, muovit, lasinpalaset, sekä muut selvästi sinne kuulumattomat jakeet. Laboratorioanalyysijä varten jae oli nopein poistaa manuaalisesti. Kuitunäyte pulperoitiin eli kuidutettiin tasaiseksi massaksi ennen puhdistus- ja lajitteluvaiheita sekä analyysijä. Pulperoinnin jälkeen tarkistettiin jäljellä olevien epäpuhtauksien määrä, ja poistettiin kuiduttumatonta ainesta.

6.3.1 Kuitunäytteen pulperointi korkeassa sakeudessa tai märkähajotuksella

Yleisesti käytettyjä menetelmiä massan hajottamiseksi ovat märkähajotus matalassa sakeudessa ja pulperointi korkeassa sakeudessa alkalisissa olosuhteissa. Tässä työssä on noudatettu PTS-RH 021 standardia ja Ingede metodia 11.

Märkähajotus

Kuituraaka-aine hajotettiin matalassa sakeudessa massan märkähajottimella (kuva 9, vas.) PTS-RH 021 standardin mukaisesti soveltaen kategoria 2:n hajotusta. Hajotus seuraa ISO 5263-1:2004 –standardia muuten, mutta veden lämpötila on poikkeava ja hajotuskierroksia on 60 000. Kuitua punnittiin noin 50 g (od) ja lisättiin 40 °C hanavettä, jolloin lopullinen hajotussakeus oli 2,5 %. Massaa märkähajotettiin 60 000 kierrosta (20 min).



Kuva 9. Laboratoriomärkähajotin vasemmalla sekä Kenwood tasomainen laboratoriosekoitin oikealla.

Korkeasakeuspulperointi

Korkean sakeuden pulperointia varten punnittiin 200 g (od) kuituseosta, mistä ei-kuitumainen jae oli manuaalisesti poistettu. Pulperointi tehtiin Kenwood planetaarisella laboratoriosekoittimella (kuva 9, oik.) 15 %:n sakeudessa käyttäen lapasekoitinta. Lämpötila oli 45 °C, mutta pulperointiaikana käytettiin Ingeden ohjeesta poiketen yhteensä 14 minuuttia eri sekoitusnopeuksilla. Kuidutuksen jälkeen sulpun suodoksista mitattiin pH:ksi 9,3 ja 9,4. (Hyväksytyt alue oli $9,5 \pm 0,2$).

Korkeasakeuspulperointiin käytettiin Ingeden standardireseptiä kemikaalien suhteen, ja jotta pH pysyi hyväksytyllä alueella, emästen annostelua pienennettiin. Natriumhydroksidin ja natriumsilikaatin suhde pidettiin alkuperäisen reseptin mukaisena. Taulukossa 2 on esitetty käytetyt kemikaalit sekä niiden annostelu.

Taulukko 2. Standardiannostelu siistauskemikaaleille. (Ingede 11)

Käytetty kemikaali	Ingede 11 annostus	Sekajättekuidun annostus /o.d. kuitu
Natriumhydroksidi (NaOH) p.a.	0,6 %	0,4 %
Natriumsilikaatti 1,5 g/cm ³ ZEOPOL 25	1,8 %	1,2 %
Vetyperoksidi H ₂ O ₂	0,7 %	0,7 %
Saippua (C ₁₈ H ₃₄ O ₂), CAS 112-80-1	0,8 %	0,8 %

Kalsiumkloridia (CaCl₂ *2 H₂O) lisättiin deionisoituun veteen halutun veden kovuuden aikaansaamiseksi 472 mg/l, mikä vastaa 18 °dH kovuutta (Ca²⁺ 128 mg/l).

Suuremman mittakaavan kuidutuksessa käytettiin Hobart pulpperia, jossa pystyi kuiduttamaan 2,5 kg sekajättekuitua kerralla. Hobartilla käytettävä annostus oli vastaava kuin laboratoriomittakaavan pulperoinnissa. Pulperointiaika taikinakoukkua käytettäessä oli yhteensä 30 minuuttia. Kuitunäytettä pulperoitiin 2 minuuttia laitteen ykkösnopeudella, 18 min. kakkosnopeudella ja 10 min. suurimmalla nopeudella.

6.3.2 Elutriaatio

Kuitujakauman sekä eri kuituosuuksien määrittämistä varten näyte-erä elutrioitiin eli kuitumassa huuhdeltiin tähän suunnitellulla laitteistolla, kuva 10. Huuhtelusuppilon geometrian vuoksi kuidut ja hienoaines nousevat virtauksen mukana ylös ja raskas jae jää suppilon alaosaan. Massasta erottui alitteena karkeaa ainesta, kuten hiekkaa, hienoa metallijauhetta ja lasia. Ylitteenä poistui kuitumainen aines, mistä ultrahienoaines poistettiin suodattamalla veden mukana.

Raaka-aineesta tehtiin matalasakeuksinen massa (0,3 %) ja huuhtelussa käytettiin laitekokoon nähden sopivaa näytekokoja, mikä oli 20 g (o.d.) Mäkisen (2013) tekemien kokeiden perusteella. Massasulppu syötettiin letkupumpun avulla erotussuppilon alaosaan nopeudella 20,8 ml/s (1800 rpm). Kuitujae suodatettiin Monodur® nylon 50 N kankaan läpi (50 µm), jolloin ultrahieno aines saatiin suodoksena talteen.

Karkean jakeen sekä ultrahienon jakeen massaosuudet määritettiin suodattamalla näyte taaratulle lasikuitusuodattimelle ja kuivaamalla sitä yön yli 105 °C lämpökaapissa.



Kuva 10. Elutriointiin käytetty laitekoonpano. (Kuva: Mäkinen 2013)

6.3.3 Painelajittelu

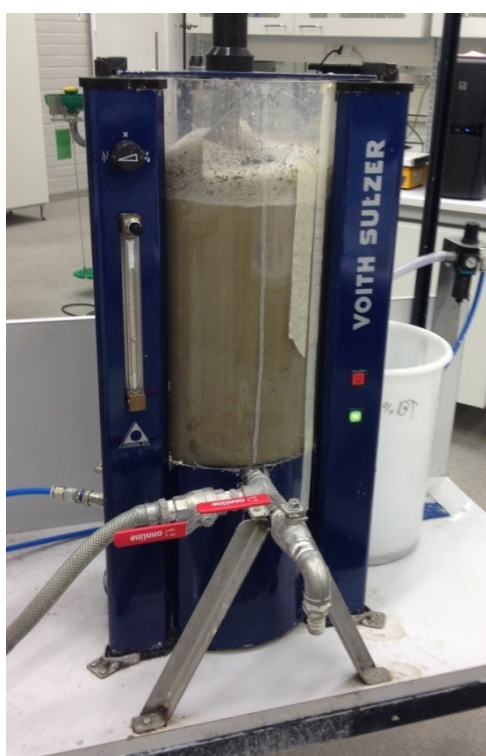
Korkeasakeuspulpperoitu näyte seulottiin täryseulalla 4 mm reikälevyn läpi ennen painelajittelua, sillä massan seassa oli runsaasti kuiduttumatonta ainesta, joka olisi tukkinut nopeasti sihtikorin. Samalla kuitumassa laimennettiin sopivaan ajosakeuteen. Painesihtilajittelu tehtiin 0,6 % sakeudessa. Pienessä sakeudessa kuituverkoston hajottamiseen tarvitaan pienempiä leikkausvoimia ja epäpuhtaudet erottuvat todennäköisemmin kuidusta ja päätyvät rejektiin. Käytetty sihtikori oli Metson TAP 03 profiloitu lankarakosylinteri, jonka rakoleveys oli 0,150 mm ja profiilin korkeus 1,10. Pinta-ala oli 0,03 m², josta avoin pinta-ala oli 6,12 %. Rakojen koko vaikuttaa merkittävästi erotustehokkuuteen, kun tarkoitus on hyvin hajotetusta massasta erottaa epäpuhtaudet rejektivirtaan. Sihtikorin koko vastasi teollisuudessa yleisesti käytössä olevaa mallia ja käytettävän korin valinta tehtiin tällä perusteella, kun vastaavanlaisen jätekuidun lajittelun onnistumisesta ei ollut aiempaa referenssiä. Sekajätekuidun lajittelussa käytettiin pumpun nopeutta 750 rpm ja lajittimen nopeus säädettiin taajuusmuuntimella 50 Hz:iin. Syöttö pidettiin vakiona 1,3 l/s.

Lajittelu ei ole koskaan kovin selektiivistä. Akseptiin päätyy todennäköisesti myös epäpuhtauksia ja rejektiin joutuu pitkää kuitua. Tähän vaikuttavat mm. kuitumassan ominaisuudet, lajittimen ominaisuudet sekä syöttövirta ja paine-ero. Näiden vaikutuksia ei pystytä yhden tutkimuksen perusteella arvioimaan tutkitulle raaka-aineelle.

6.3.4 Flotaatio

Flotaatioon eli vaahdotussiistaukseen käytettiin Voith Delta 25TM vaahdotuskennoa (ks. kuva 11). Flotaation tarkoituksena prosessoinnissa on poistaa pienempikokoista likaa, kuten irronnutta mustetta, tahmoja ja likapilkkuja kuitumassasta. Ajoparametreinä käytettiin Ingeden standardin mukaista 180 g (o.d.) näytekokoa 0,8 % sakeudessa, joka syötettiin esilämmitettynä (45 °C) flotaatiokennoon. Vaahdotuksen kesto oli 12 minuuttia jonka aikana ilmasyöttö oli säädettyinä 7 l/min. (Ingede 11)

Ylitteestä eli vaahdotuksen rejektistä määritettiin sakeus, jotta saatiin laskettua kuitusaanto. Flotaation aksepti otettiin talteen jatkoanalyysijä varten.



Kuva 11. Voith Delta 25 litran flotaatiokenno

6.3.5 Hyperpesu

Hyperpesulla (HW) tarkoitetaan kuitumassan pesua viiralla ylimäärällä vettä, jolloin kuitumassassa oleva hienoaines saadaan poistettua ilman kuituhäviötä. Massaa pestiin Sommerville-täryseulalla 150 meshin viiralla 8,5 l/min vesivirtauksella 20 minuuttia.

Hyperpestyistä näytteistä valmistettiin optisiin mittauksiin 40 g/m² arkkeja. Myös fraktioinnit ja kuitujakauma-analyysi tehtiin hyperpestyistä näytteistä. Hyperpesu kuuluu myös tässä työssä käytettyyn likapilkkuanalyysimenetelmään, joskin analyysi on

mahdollista tehdä suoraan massasta ilman pesuvaihetta. Hyperpesun avulla poistetaan esimerkiksi likapilkkujen määrittystä häiritsevä irtomuste hienoaineksien lisäksi.

6.4 Analyysit

6.4.1 Kuitujakauman analysointi putkivirtausfraktioidin avulla

Elutriaatiossa saatu kuitumainen jae fraktioitiin edelleen Metson putkivirtausfraktionaattorilla neljään alajakeeseen, joita ovat kuitukimput, pitkä kuitu, lyhyt kuitu sekä hienoaines. Kuitufraktion kokojakauma analysoitiin perustuen yksittäisten kuitujen kuva-analyysiin ja tuloksena saatiin mm. eri jakeiden keskimääräisiä kuitupituuksia sekä jakeiden prosentuaalisia osuuksia.

Analyysi aloitettiin kaatamalla noin 300 ml matalassa sakeudessa (0,3 %) olevaa hajotettua kuitumassaa fraktionaattorin kiinteään näyteastiaan, mistä eteenpäin putkivirtauskolonniin kulkeutuva mittaustilavuus on 50 ml. Kuidut erottuvat toisistaan virtauksessa ja putken loppupäästä voidaan ottaa talteen neljä eri kuitufraktiota. Ajoparametreinä käytetään OCC –massalle suunniteltua fraktiointiohjelmaa (line 10), missä ensimmäisen fraktion talteenotto tapahtuu aikaisemmin ja kaikki kuituuntumaton materiaali päätyy ensimmäiseen jakeeseen.

6.4.2 Kuiva-aine ja tuhkapitoisuus

Kuitufraktion kuiva-aine ja tuhkapitoisuus analysoitiin Precisan prepASH 129 termogravimetrilla. Täysautomaattinen tuhka-analyysiproseduuri läpikäy kuivatuksen 105 °C:ssa sekä polton 525 °C:ssa ja 900 °C:ssa. Automaattinen ohjelma ajaa ISO 1762 sekä ISO 2144 standardien mukaisen ohjelman. Tuhkan ja hehkutusjäännöksen osuus ilmoitetaan prosentteina kuivan näytteen painosta.

6.4.3 Optiset mittaukset arkeista

Elrepho 070 spektrofotometrillä (Lorenzen & Wettre, Ruotsi) voidaan analysoida laboratorioarkeista useita erilaisia optisia ominaisuuksia. Vaaleusarvo on paperin ominaisheijastusluku aallonpituudella 457 nm, joka kuvaa yksinkertaisemmin paperin kykyä heijastaa valoa. Vaaleusmittaus tehtiin SFS ISO 2740-standardin mukaisesti prosessoiduista kuitumassanäytteistä jokaisen yksikköoperaation jälkeen. Vaaleus

mitattiin myös vetyperoksidivalkaistusta massasta. Y-arvo kuvaa paremmin ihmissilmin havaittavaa vaaleutta, sillä sen mittausspektri on laajempi, 400–700 nm. Sekä vaaleus että Y-arvo ilmoitetaan prosentteina. Opasiteetti ilmoittaa paperin läpinäkyvyyden siten, että korkean opasiteetin omaava tuote kuultaa läpi vain vähän. Sirona ja vastaavasti valon absorptio ilmoitetaan neliömassayksikköä kohti ja kun paperin vaaleus lisääntyy sironnakertoimen kasvaessa, samanaikaisesti opasiteetti huononee. Opasiteettiin voidaan vaikuttaa lisäämällä hienoja täyteaineita tai käyttämällä päällysteitä. Opasiteetin ja vaaleuden merkitys tulee esiin paperin paino-ominaisuuksien yhteydessä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003:101–103)

Arkki valmistus optisia mittauksia varten

Vaaleusarvoa, Y-arvoa sekä jäännösmusteen mittausta vasten valmistettiin kahdenlaisia arkkeja seuraavasti: 1) alhaisen neliömassan 30 g/m² arkki suodatinpaperiarkin päälle (hajotetusta kuitumassasta), 2) alhaisen neliömassan 40 g/m² arkki suodatinpaperiarkin päälle (hyperpestystä kuitumassasta) Korkön kehittämän proseduurin mukaan (ei standardoitu) sekä Ingede -menetelmän mukainen 225 g/m² neliömassan kakku Büchner-suppilossa. (Körkkö *et al.* 2011, Körkkö 2012)

Kummatkin alhaisen neliömassan arkit valmistettiin samalla tavalla suodattamalla kuitumassa arkkimuotissa 1–2 µm huokoskoon omaavan (Munktell 00H) suodatinpaperiarkin päälle. Tämän suodatinpaperin pinta on riittävän sileä, jotta arkki saadaan kohtuullisen helposti irrotettua mittauksia varten. Suotautumisen jälkeen arkkeja puristettiin arkkipuristimessa 4 MPa, 2 min ja kuivattiin 6 h kiertoilmakaapissa. Saatujen arkkiin retentio on hyvin korkea, sillä hienoaines ei kulkeudu paperin läpi kiertoveden mukana kuten perinteisessä arkinvalmistuksessa, vaan retentoituu arkkiin.

Lisäksi valmistettiin standardin TAPPI T 218 sp-02 mukainen kakku, jonka neliömassa oli 225 g/m². Kuitumassa (5 g o.d.) suodatettiin Büchner-suppilossa viiran ja kostutetun suodatinpaperin (VWR 413, Ø 150 mm, 5–13µm) päälle. Kakku puristettiin arkkipuristimessa (4 MPa 2 minuuttia) ja kuivattiin kiertoilmakaapissa. Näiden paksujen kakkujen, ”padien” opasiteetti on riittävän korkea (> 97 %), jotta heijastus pinnasta on täydellinen, eikä läpi pääse säteilyä. Padista saatua hajaheijastusarvoa, R_{∞} eli ominaisheijastuslukua voidaan siis hyvin käyttää absorptiokertoimen laskussa (kaava 1), minkä avulla jäännösmuste saadaan määritettyä (kaava 2).

Jäännösmusteen määrittäminen ohuista arkeista

Jäännösmusteella tarkoitetaan siistattuun massaan jääneitä painomustepartikkeleita, mitkä aiheuttavat värin harmautta. Jäännösmusteen määrittäminen (ERIC₇₀₀) on yleisesti käytetty määrittämään kierrätysmassassa olevan musteen määrää. Määrittäminen perustuu laboratorioarkista mitatun heijastuman sekä sirontakerotoimen avulla laskettuun musteen määrään. (Körkkö *et al.* 2011) Analyysissä mitataan suhteellista ns. jäännösmustetta (*Effective Residual Ink Concentration*, ERIC) ja se määritetään standardin ISO 22754 (TAPPI T 567 om-09) mukaisesti, mutta aallonpituudella 700 nm. Tätä merkitään yleisesti ERIC₇₀₀ jäännösmusteeksi. Hajotetusta, mutta ei-hyperpestystä massasta saadaan mitattua kokonaismusteen määrä ja hyperpestystä massasta vain kuituihin sitoutunut muste. (Körkkö 2012)

Mittaus tehtiin Elrepho 070 spektrofotometrillä aallonpituudella 700 nm molemmilta puolin 75 mm x 75 mm kokoon leikatuista arkeista. Muut arkit toimivat pinossa taustana mittauksen aikana. Ohuet arkit mitattiin sekä pinossa että yksittäisinä arkkeina mustan ontelon päällä sirontakerotoimen määrittäystä varten.

Kaavojen 1 ja 2 avulla saadaan määritettyä jäännösmuste, ERIC₇₀₀

$$k = \frac{s \cdot (1 - R_\infty)^2}{2 \cdot R_\infty} \quad (1)$$

$$ERIC = \frac{k}{k_{ink}} \cdot 10^6 \quad (2)$$

missä

k on absorptiokerroin (m²/kg),

R_∞ on padista saatu hajaheijastusarvo 700 nm:ssä,

s on sirontakerroin (m²/kg) ja

k_{ink} on vakioksi asetettu musteen absorptiokerroin (10000 m²/kg).

Sirontakerroin voidaan määrittää kaavan 3 avulla.

$$s = \frac{R_{\infty}}{w \cdot (1 - R_{\infty}^2)} \cdot \ln \frac{R_{\infty} \cdot (1 - R_0 \cdot R_{\infty})}{(R_{\infty} - R_0)} \quad (3)$$

missä

w on arkin neliömassa (kg/m²),

R₀ on yhden arkin hajaheijastusarvo mustan ontelon päällä ja

R_∞ on läpinäkymättömästä arkkipinosta mitattu hajaheijastusarvo.

6.4.4 Likapilkut

Likapilkkujen määrä ja koko paperikuituarkissa on tärkeä laatustandardi, millä voidaan mitata massan puhtautta. Likapilkuiksi määritellään kaikki taustaansa selvästi tummemmat erimuotoiset, kooltansa noin 50–500 μm (jopa 1000 μm) olevat partikkelit. Likapartikkelit voidaan analysoida joko visuaalisesti tarkastelemalla tai tehtävään soveltuvan kuva-analyysin avulla, jota myös tässä työssä käytettiin. DOMAS (*Digital Optical Measurement and Analysis System*) on tietokoneohjelmistopaketti, joka on suunniteltu määrittämään paperin erilaisia ominaisuuksia, kuten likapilkut, makrotahmot ja formaatio. Näyte kuvannetaan skannaamalla ja tulokset saadaan analyysin jälkeen suoraan Excel-taulukon jatkokäsittelyä varten. (PTS 2014)

Märkähajotettua kuitumassaa hyperpestiin 20 minuutin ajan Sommerville –laitteistolla, 150 meshin viiralla (105 μm) hienoaineksessa olevan musteen poistamiseksi. Käytettiin reilu ylimäärä vettä ja varmistettiin hienoaineksen poistuminen tarkistamalla ylijoukseen veden puhtaus silmämääräisesti. Vesivirtaus säädettiin vakioksi 8,5 l/min.

Hyperpestyä massasta valmistettiin arkkimuotilla viisi kappaletta 70 g/m² arkkia. Arkit kuivattiin ilmastoidussa kaapissa ennen analysointia. Likapilkkuarkit skannattiin (Epson 1680Pro) skannerilla molemmin puolin ja likapilkkujen määrä sekä pinta-ala analysoitiin DOMAS –kuva-analyysiohjelman avulla. Analyysissä käytetty resoluutio oli 600 dpi ja kynnyksarvona olivat 15 % taustaansa tummemmat pilkut.

6.4.5 Makrokokoiset tahmot

Tahmot ovat kierrätyskuiduissa olevia tahmeita yhdisteitä, jotka ovat peräisin paperinvalmistuksessa käytettävistä liima-aineista, painovärien sideaineista sekä

päällystysaineista, kuten latekseista. Paperin valmistusta tahmot vaikeuttavat huonontamalla ajettavuutta paperikoneella samalla heikentäen tuotteen laatua. Kokonsa puolesta tahmot ovat jaettavissa kahteen luokkaan. Suurin osa on mikrokokoisia (alle 100 µm), jotka poistuvat helposti flotaatiossa. Enemmän ongelmia prosesseissa aiheuttavat makrotahmot kuitenkin ovat määrällisesti pienempi ryhmä. Makrotahmot voidaan määrittää laboratoriossa tehtävän Sommerville -pesun rejektinä käyttämällä 100 µm rakosihtiä ja analysoimalla sihdin läpäisemätön tahmoaines. (Sarja 2007)

Sekajätteen kuitujakeen sisältämät makrotahmot analysoitiin INGEDE 4 metodin mukaisesti. Makrotahmoanalyysiä varten märkähajotettu massanäyte laimennettiin 1 % sakeuteen. Fraktiointivaihe tehtiin Sommerville -tyyppisellä seulalla 100 µm:n rakosihdillä käyttäen 8,6 l/min vesivirtausta ja 20 min fraktiointiaikaa. Kuitusulppua punnittiin analyysiin noin 10 g (o.d.) ja tarkka paino merkittiin muistiin laskentaa varten. Sommerville -seulonnan jälkeen sihdin päälle jäänyt rejekti otettiin talteen analyysiin huuhtelemalla se sihdiltä noin 2 litran vesimäärään. Vesi kaadettiin arkkimuottiin, jossa aines suodatettiin (Munktell 1003, retentio 12–15 µm) suodatinpaperiarkille. Valkoiselle suodatinpaperille tasaisesti jakaantuneet tahmot tunnistettiin arkin värjäyksen (Pelikan 4001 muste) avulla. Muste värjää hydrofiiliset partikkelit mustiksi jättäen hydrofobiset partikkelit valkoisiksi. Tahmoarkkeja valmistettiin 3 kpl, joista alumiinioksidimerkinnän (korundipulveri, Al₂O₃) avulla valkoiset partikkelit voitiin analysoida tahmoaineiksi. Arkit skannattiin ja määritettiin DOMAS kuva-analyysin avulla näytteessä oleva keskimääräinen tahmojen määrä sekä pinta-ala.

6.4.6 Arkin formaation määrittäminen

Paperin formaatio eli epävirallisesti paperin pilvisuus tarkoittaa kuitujen flokkiutumista kimpuiksi sen sijaan että jakautuminen olisi tasaista. Formaatio on hyvä kun paperin neliömassavaihtelu pienessä mittakaavassa on vähäistä. Formaatio on yleensä parempi lyhytkuituisessa kuin pitkäkuituisessa arkissa. Formaation tasaisuus vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi vetolujuuteen tai paperin huokoisuuteen. Myös optiset ominaisuudet vaihtelevat formaation ollessa huono. Analyysimenetelmä perustuu valon läpäisevyyteen tutkittavalla pinta-alalla, minkä avulla ohjelma tunnistaa flokkien kokoa sekä orientaatiota. (PTS 2014)

Tässä työssä arkit skannattiin vastavalolla Epson 1680Pro skannerilla molemmin puolin ja tulokset käsiteltiin automaattisella PTS:n (Papier Technische Stiftung) digitaalisella DOMAS –kuva-analyysiohjelmalla. Käytetty resoluutio oli 210 dpi. Formaatiotulokset siirtyivät suoraan Excel-taulukkoan analysoitavaksi. Formaatio määritettiin kahdesta rinnakkaisesta arkista. Analysoitavat näytteet olivat mekaanisesti märkähajotettu sekajätekuitu, korkeasakeuspulperoitu sekajätekuitu sekä mekaanisesti märkähajotettu referenssikuitu. Mittauksiin otettiin mukaan PFI-jauhamaton näyte sekä 500 ja 1500 kierrosta jauhetut näytearkit.

6.4.7 Kalorimetrinen lämpöarvo

Lämpöarvon määrittämiseen käytettiin IKA kalorimetria (C2000). Lämpöarvo määritettiin kalorimetrisesti eli polttamalla tunnettu määrä ainetta puhtaassa hapessa ja mittaamalla siitä vapautuva energiamäärä. Kalorimetrinen lämpöarvo on laskettu kaavan 4 mukaisesti ja tuloksena saatiin kalorimetrinen lämpöarvo absoluuttisen kuivalle näytteelle yksikössä MJ/kg. Kalorimetrinen lämpöarvo (ylempi lämpöarvo) on lämpöenergian määrä, joka vapautuu, kun 1 kg polttoainetta palaa täydellisesti ja palamistuotteet jäähtyvät 25 °C lämpötilaan. Tehollinen lämpöarvo (alempi lämpöarvo) vastaavasti on se lämpöenergian määrä, joka vapautuu, kun sekä polttoaineen vesi, että palamisessa muodostunut vesi ovat vesihöyryinä. Tehollinen lämpöarvo on veden höyrystymislämmön verran alempi kalorimetristä lämpöarvoa. (Alakangas 2000)

$$Q_d = Q_{ad} \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (4)$$

missä

Q_d = kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg.

Q_{ad} = analyysikostean (ilmakuivan) näytteen kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg.

M_{ad} = näytteen (ilmakuivan) analyysikosteus, %.

6.4.8 FESEM-kuvat laboratorioarkeista

Arkit kuvattiin Zeiss Ultra Plus FESEM:in eli kenttäemissiopyyhkäisymikroskoopilla (Field Emission Scanning Electron Microscope). Tutkimuslaitteen avulla mitataan elektronien diffraktiota näytteestä ja saadaan informaatiota rakenteesta ja pinnanmuodoista. FESEMillä saadaan hyvin tarkka kuva arkin pinnasta, jolloin voidaan arvioida kuitujen verkottumista ja sitoutumista. Tavoitteena oli löytää eroja tai samankaltaisuuksia sekajätekuidusta valmistetusta arkista verrattuna

referenssikuituarkkeihin sekä havainnollistaa jauhatusteiden vaikutusta arkin pinnan laatuun.

Lujuusmittauksia varten valmistetuista 60 g/m² arkeista leikattiin noin 1 cm x 1cm kokoiset arkkinäytteet. FESEM näytenapille kuvattavaksi asetettiin arkin sileämpi puoli, koska arvioitiin suuremman osan hienoaineesta olevan arkin pintapuolella ja häiritsevän kuiturakenteen tutkimusta. Tutkitut FESEM -näytteet on lueteltu taulukossa 3.

Taulukko 3. FESEM:illä kuvatut näytteet sekä niiden jauhatusteet

Nimi	Tunnus	PFI-jauhatuste
Märkähajotettu sekajätekuitu	A1	jauhamaton
Märkähajotettu sekajätekuitu	A3	1 500 krs
Referenssikuituseos	B1	jauhamaton
Referenssikuituseos	B3	1 500 krs
Korkeasakeuspulpperoitu sekajätekuitu	C1	jauhamaton
Korkeasakeuspulpperoitu sekajätekuitu	C3	1 500 krs
Test-liner referenssi	D1	-
Kopiopaperireferenssi (valmis arkki)	R1	-

6.5 Raaka-aineen siistattavuuden arviointi

6.5.1 Kierrätettävyyden arviointi laboratoriomittakaavan siistauksen avulla

Keräyspaperin jatkokäytön mahdollistaa painatuksessa käytetyn musteen tehokas poisto massasta. Keräyskuidun siistattavuutta voidaan testata laboratorio-olosuhteissa yksinkertaisella menetelmällä, joka mittaa musteen poistumisen tehokkuutta flotaatiokennoissa. Sekajätteestä erotetun kuitunäytteen tutkimukseen käytettiin International Association of the De-inking Industry (INGEDE) menetelmää no. 11. Menetelmässä korkeasakeuspulpperoituvaiheen jälkeisessä alkalisissa olosuhteissa tapahtuvassa vaahdotuksessa eli flotaatiossa pyritään nostamaan massan vaaleutta poistamalla mustetta sekä muita kiinteitä kontaminantteja, esimerkiksi tahmoja.

Tässä työssä siistattavuuden arviointia varten lajiteltiin säkillinen (kokonaismassa oli 23,5 kg, abs.kuiva paino 14,5 kg) sekajätteestä erotettua kuituainesta. Näytteestä otettiin erilleen ei-kuitumainen, epäorgaaninen jae. Kuitumaisesta osasta punnittiin näytteet analyysihin.

Kuituaines pulperoititiin alkalisissa olosuhteissa Ingeden menetelmäohjeen no. 11 mukaisesti. Tehtiin kaksi vastaavanlaista pulperointia (o.d. 200 g), jotta kuitua olisi riittävästi vaahdotukseen.

Flotaatioon käytettiin Voith Delta vaahdotuskennoa. Massaa (180 g o.d.) vaahdotettiin 0,8 %:n sakeudessa 45 °C lämpötilassa 12 minuuttia. Ilmansyöttö oli säädetty vakioksi 7 l/min. Ajanotto käynnistettiin heti ilmansyötön alettua.

Käsiteltävästä massanäytteestä analysoitiin likapilkut kahdessa eri kokokategoriassa. Vaaleusmittarilla tarkistettiin Y-arvo sekä vaaleus sekä CIELAB -väriavaruuden arvot, jotka paljastavat kuitumassan mahdollisen harmauden tai keltaisuuden. Yhtenä prosessiparametrina määritettiin myös musteen poistuminen massasta. Vaaleus ja opasiteetti mitattiin massakakuista, jotka tehtiin sekä ennen flotaatiota otetusta siistaamattomasta massanäytteestä että flotaation jälkeisestä, siistatusta massasta.

7 SEKAJÄTEKUIDUN PAPERITEKNISEN POTENTIALIN SELVITTÄMINEN

7.1 Standardijauhatusta ja -arkkien valmistus

Arkin neliömassalla tarkoitetaan painoa (g) neliön pinta-alalla. Neliömassan vaihtelu aiheuttaa vaihtelua myös paperin muissa ominaisuuksissa, kuten vaaleudessa ja opasiteetissa (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003) ja tämän vuoksi analyysijä varten tehtävät laboratorioarkit valmistetaan tunnettuun neliömassaan.

Paperiteknisten ominaisuuksien mittausta varten valmistettiin arkkimuotilla 8 kappaletta 60 g/m² arkkeja (ISO 5269-1). Paperiteknisinä perusominaisuuksina mitattiin paksuus, neliömassa, vaaleus, opasiteetti, puhkaisulujuus, puhkaisuindeksi, vetoindeksi, repäisylujuus, ja repäisyindeksi.

Puukuidut, joista paperi muodostuu, ovat hygroskooppisia eli ne pyrkivät kosteustasapainoon ympäröivän ilman kanssa, mikä tarkoittaa sitä, että paperi on erittäin altis ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden muutoksille. Paperin hygroskooppisen luonteen vuoksi näytearkit on ilmastoitava standardin (ISO 187) mukaiseen tasapainokosteuteen, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Tämä tapahtui kuivaamalla arkit kiertoilmakaapissa (6 h) ja säilyttämällä arkit 23 °C ±1 °C lämpötilassa sekä 50 % ± 2 % suhteellisessa kosteudessa ennen paperiteknisten ominaisuuksien mittaamista.

Osa näytteistä jauhettiin ennen arkkien valmistusta PFI-jauhimella standardin ISO 5264-2 mukaisesti eri kierrosmäärillä. Jauhatuksen kierroslukuina käytettiin standardista hieman poiketen 500, 1500 sekä 3000 krs.

7.2 Arkkien lujuusominaisuudet

Lujuusmittauksissa tulokset on suhteutettava näytearkin paksuuteen sekä neliöpainoon, jotka kummatkin määritettiin ennen lujuustestauksia. Näytearkin paksuus mitattiin Lorenzen & Wettre mikrometrillä (ISO 5270:1998) (kuva 12). Mittaus tehtiin kuuden arkin pinosta viitenä rinnakkaisena mittauksena. Jakamalla keskiarvo arkkien lukumäärällä saatiin yhden arkin keskimääräinen paksuus. Neliöpaino määritettiin

punnitsemalla kaikki näytearkit tasapainokosteudessa analyysivaa'alla ja valitsemalla niistä kuusi samanpainoisinta lujuusmittauksiin. Kuvassa 12 on esitetty kaikki arkkien fysikaalisiin testauksiin käytetyt laitteet.



Kuva 12. L & W paperiteknisten ominaisuuksien mittaukseen käytettyjä laitteita. Repäisylujuusmittari (vas. ylh), puhkaisulujuustesteri (oik. ylh.), mikrometri eli paksuusmittari (vas. alh) sekä vetolujuusmittauslaite (oik. alh.)

Referenssimassana (Kuva 13) käytettiin keräyspahvi- ja paperinäytteistä koottua seosta, jolle tehtiin vastaavat hajotukset sekä kuitujakauma-analyysi. Referenssimassasta valmistettiin lujuusmittausarkit vastaavasti kuin sekajätekuidusta. Toinen vertailuarvo

saatiin test-liner –referenssistä. Test-liner –pahvi hajotettiin märkähajotuksella ja siitä tehtiin myös saman neliöpainon lujuusarkkeja analysoitavaksi.



Kuva 13. Referenssiksi koottu kierrätyspaperi ja –pahviseos

Lujuusmittaukset tehtiin tilassa, missä olosuhteet vastasivat tasapainokosteutta ja lämpötila pysyi vakiona. Analyysit suoritettiin standardien mukaisesti riittävillä toistomittauksilla. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu mitatut lujuusominaisuudet ja niiden keskeisimmät ominaispiirteet.

Vetolujuus

Vetolujuuteen vaikuttavat kuitujen lujuus ja pituus, kuitujen väliset sidokset, kuitujen orientoituminen ja formaatio sekä kuivatuksessa tapahtunut kutistuminen. Pitkillä kuiduilla saadaan parannettua lujuusominaisuuksia, kun taas lyhyt kuitu vaikuttaa saavuttamaan hyvän formaation. Huono formaatio tarkoittaa neliömassavaihtelua siten, että pienellä pinta-alalla on ohuempia ja paksumpia kohtia. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003: 95–98)

Paperin vetolujuudella tarkoitetaan suurinta kuormitusta, jonka paperiliuska kestää pinnan suuntaisesti vedettäessä murtumatta. Vetolujuus määritettiin standardin ISO 1924-2 mukaisesti määrättyyn mittaan katkaistuista suikaleista. Arkeista leikattiin arkkileikkurilla 12 kpl 10 mm x 150 mm kokoista suikaletta. Vetolujuus mitattiin L&W vetolujuusmittarilla (kuva 12) ja saatujen mittausten keskiarvona määritettiin vetolujuusindeksi [kNm/kg] sekä venymä [%].

Repäisylujuus

Repäisylujuus on työ, joka tarvitaan repäisemään arkkiniippu alkuviillosta loppuun asti. Repäisylujuuteen oleellisesti vaikuttavia tekijöitä ovat kuidun lujuus ja pituus. Kuituorientaatio ja kuitujen väliset sidoslajuudet ovat erityisesti paperikoneella ajettavan rainan konesuuntaisen vetolujuuden ja samalla poikkisuuntaisen repäisylujuuden edellytykset. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003: 98–99)

Repäisylujuuden määrittystä varten arkeista leikattiin suorakaiteen muotoiset (32 x 42 mm) testikappaleet (ISO 5270:1998.) Testi tehtiin neljän näytekappaleen pinoissa Lorenzen & Wettre repäisylujuuden mittausrakenteella (kuva 12). Arkkiniippu puristettiin laitteen leukojen väliin ja alkuviillon leikkaamisen jälkeen heiluri vapautettiin, jolloin se repäisi arkkiniipun. Heilurin kulkema matka on verrannollinen paperin repeämistä vastukseen, ja näiden avulla saatiin repäisylujuus [kPa] tutkituille arkeille.

Puhkaisulujuus

Puhkaisulujuus analysoidaan ISO 2758 standardin kuvaamalla tavalla näytearkeista. Arkki puhkaistaan kumikalvon ja hydraulipaineen avulla ja puhkaisuun tarvittava voima kuvaa arkin kuitulujuutta ja antaa hyvän yleiskuvan tuotteen lujuudesta. Puhkaisulujuus on tärkeä laatuominaisuus erityisesti pakkausmateriaaleilla. Indeksimuotoisena sitä voidaan vertailla eri neliömassaisten paperi- ja kartonkituotteiden lujuuksiin.

Käsiarkeista leikattiin 6 kpl 64 mm x 141 mm kokoisia näytearkeja, joista jokaisesta tehtiin yhteensä kaksi mittausta eri puolilta arkkia. Mittaukset tehtiin L & W puhkaisulujuusanalysaattorilla (kuva 12). Tuloksina saatiin keskiarvo puhkaisulujuudelle [kPa] sekä puhkaisuindeksille [kPa · m²/g].

7.3 Vetyperoksidivalkaisu

Suomessa käytetyimpiä menetelmiä uusiomassan valkaisuissa ovat hapettava vetyperoksidi- (H₂O₂) tai pelkistävä natriumditioniittivalkaisu (Na₂S₂O₄). Valkaisuprosessi voi olla myös kaksivaiheinen, missä käytetään sekä hapettavaa että pelkistävää vaihetta, jotta saavutetaan riittävä vaaleusaste. Valkaisun tavoitteena on siis poistaa ja ehkäistä valon, lämmön ja alkalikäsittelyn aiheuttamaa kellastumista. (Göttsching & Pakarinen 2000, Mauno 2010)

Hapettava vetyperoksidivalkaisu tehtiin laboratoriossa muovipusseissa (polypropeeni). Valkaisukoe tehtiin lajittelun jälkeisen flotaation akseptille. Annosteluna käytettiin aiemmissa kierrätyskuitututkimuksissa hyväksi todettua kemikaalireseptiä. (Vahlroos *et al.* 2008) Kemikaaliannostukset on esitetty taulukossa 4. Valkaisun reaktiolämpötilana käytettiin 90 °C, viipymäaikana 40 min ja käsittelysakeutena 10 %.

Valkaistusta kuitumassasta analysoitiin ISO-vaaleus jauhamattomista näytteistä valmistetuista massakakuista, joiden neliömassa oli 225 g/m².

Taulukko 4. Vetyperoksidivalkaisun kemikaaliannostelut

Valkaisukemikaali	Vetyperoksidi (kg/t)	Natriumhydroksidi (kg/t)	Natriumsilikaatti (kg/t)
Annostelu	20	3	10

8 MIKROBIOLOGISET RAJOITTEET SEKAJÄTTEESTÄ EROTETUN KUIDUN HYÖDYNTÄMISESSÄ

Mikrobiologisen kontaminaation selvitys maljavalulla

Näytteissä olevien mikro-organismien määrä selvitettiin maljavalumenetelmällä. Maljavalut tehtiin selektiivisille maljoille, missä muiden kuin tutkitun mikrobien kasvu on estetty. Maljat valittiin näytteessä olevan oletetun mikrobifloran perusteella. Sekajätekuitunäytteen oletuslöydökset ovat lukuisat kosteushomeet, sädesienet, elintarvikkeiden pilaajabakteerit ja sellulolyttiset bakteerit sekä sienet. Mikrobiston runsaan lajiston vuoksi päädyttiin tarkastelemaan kokonaisbakteerimäärää sekä hiivoja ja homeita kvantitatiivisella tasolla. Käytettiin valmiita 3M™ Petrifilm™ selektiivisiä kasvatusalustoja, jotka sisältävät sopivan agarin, geeliytymisaineen sekä indikaattoriväriä helpottamaan tunnistamista.

Yeast and Mould Count Plate on suunniteltu hiivojen ja homeiden määrittämiseen 3-5 päivässä. Tulosten analysoinnissa homeiden ja hiivojen lukumäärä lasketaan käsin. Hiivat ovat tyypillisesti pieniä, kohonneita, sinivihreitä ja tarkkareunaisia kasvustoja, kun taas homeet ovat usein isompia, monivärisempiä, rosoreunaisia ja litteitä kasvustoja.

3M™ Petrifilm™ Aerobic Count Plate on suunniteltu kokonaisbakteerien määrittämiseen 48 tunnissa. Lukumäärä voidaan laskea käsin tai siihen suunnitellulla Petrifilm™ Plate Readerillä ja tulos ilmoitetaan pesäkkeiden lukumääränä grammaa lähtöainetta kohti. Bakteeripesäkkeet värjäytyivät omalla vaalealla kasvualustallaan punaisiksi.

Sekajätekuitumassaa punnittiin 5 g 0,9 % NaCl:iin. Näytteen annettiin sekoittua magneettisekoittajalla huoneenlämmössä 60 minuuttia ennen maljausta. Näytteestä tehtiin laimennossarja 10^{-2} – 10^{-5} , jotka viljeltiin kahtena rinnakkaisena kasvatuksena. Bakteerimaljat inkuboitii 32 °C 48 h ja home/hiivamaljat 25 °C 3 vrk.

9 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

9.1 Raaka-aineen lähtötiedot

Lajitellun kuituaineksen kosteus analysoitiin jokaisesta näyte-erästä. Kosteusprosentti vaihteli paljon eri näytesäkeissä, sekä saman säkin erikokoisessa jakeessa. Useiden eri analyysien vaihteluväliksi kosteudelle saatiin noin 35–45 %. Näytteestä veteen hajotetun massan pH oli 7,7.

Näyte-eristä manuaalisesti erotettu suurikokoinen, karkea jae sisälsi mm. muoveja, metallikappaleita, styroxia ja lasia. Jakeen määrä vaihteli eri näyteotoksissa 8–13 % välillä. Vaikeutena oli erottaa kaikista pienimpiä muovinkappaleita tai metalleja. Osa näistä, sekä hajoamaton märkälujia paperi pystyttiin poistamaan helpommin vasta kuidutuksen jälkeen.

Vaaleus ja opasiteetti

Lähtömassan karakterisoinnin tuloksena ongelmana nähtiin erityisesti alhainen vaaleus. Uusiomassaa vastaava tavoitetaso olisi noin 60–65 % paikkeilla prosessoinnin jälkeen, kun tutkittavasta sekajätekuitumassasta analysoitu arvo oli noin 30 %. On selvää, ettei vaaleus yllä siistausmassan vaaleuden tasolle suuren pakkausmateriaalimäärän vuoksi. Yleensä siistaamaton massa on ISO-vaaleudeltaan noin 45 %. Massan tummuus voi johtua kuidun vanhenemisestä tai pilaantumisesta mikrobitoiminnan vaikutuksesta.

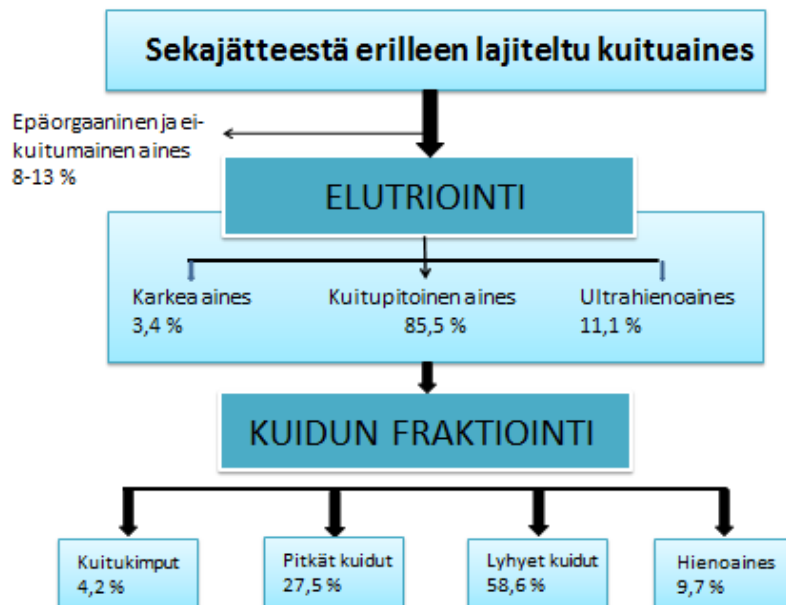
Opasiteetti lähtötilanteessa oli 96,5 % 30 g/m² arkista mitattuna ja 93,6 % hyperpestystä 40 g/m² arkista. Mekaanisilla kuiduilla opasiteetti on yleensä korkeampi eli ne ovat läpinäkymättömämpiä kuin kemialliset massat johtuen mekaanisen jauhatuksen aiheuttamasta suuremmasta hienoaineen ja lyhyemmän kuidun määrästä. Sekajäte kuidun opasiteetti riittäisi hyvin painopapereihin, kuten aikakusilehtiin, jos vaaleus olisi korkeampi.

Kuitujakauma

Elutriaation avulla saatiin määritettyä massaosuudet karkealle jakeelle sekä ultrahienolle jakeelle, jotka olivat 3,4 % ja 11,1 %. Kuitujakeen osuus oli tutkitussa näytteessä 85,5 %. Kuitujae analysoitiin edelleen putkivirtausfraktionatorilla neljään eri jakeeseen.

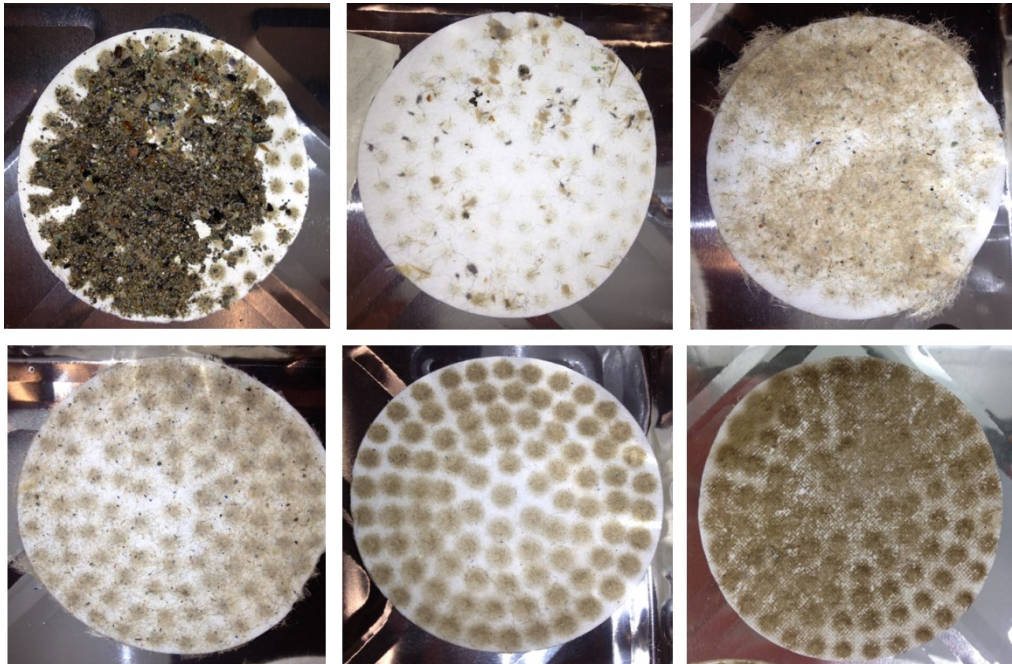
Kuvassa 14 on esitetty kaaviona eri jakeiden osuudet. Huomataan, että lyhyen kuidun osuus on verrattain suuri, lähes 60 %. Pitkää kuitua oli näytteessä noin kolmannes.

Kuidun keskipituus tässä otoksessa oli 0,75 mm ja standardin mukainen ISO –pituus 1,03 mm, mikä on aika lyhyttä. Pieni kuitukoko on hyödyksi ainoastaan valmiin paperin paino-ominaisuuksissa, koska niillä aikaansaadaan tasainen pinta ja värien imeytyminen. Lujuusominaisuuksia lyhyt kuitupituus sitä vastoin heikentää.



Kuva 14. Eri kuitufraktioiden osuudet kuitunäytteessä

Kuvaan 15 on koottu kuvat kuitujakauman eri fraktioista. Tässä näyte-erässä karkea aines koostui melkein ainoastaan hiekasta ja kuitukimppuja/kuiduttumatonta ainesta oli vähän. Eri näyte-erien välillä oli eroa koostumuksessa ja tasalaatuisten näytteiden kokoaminen oli vaikeaa. Kuvassa 15 olevat jakeet on saatu märkähajotuksella kuidutetusta näytteestä. Korkeassa sakeudessa pulpperoidussa, vastaavasti elutroidussa ja fraktioidussa näytteessä kuiduttumattoman jakeen osuus oli selvästi suurempi ja myös karkeaan jakeeseen erottui elutroinnissa kuituuntumatonta paperia.



Kuva 15. Kuvat elutrioinnin sekä kuitufraktioinnin jakeista. Ylemmällä rivillä vasemmalta lukien: karkea aines, kuitukimput sekä pitkä kuitu. Alemmalla rivillä vasemmalta lukien: lyhyt kuitu, hienoaines sekä ultrahieno aines.

Lämpöarvo

Sekajätteestä erotetun kuidun kalorimetrinen lämpöarvo oli tutkitussa näytteessä 15,8 MJ/kg ja tehollinen lämpöarvo 14,3 MJ/kg. Vertailuarvona voidaan käyttää lajittelemattoman sekajätteen polttoarvoa, joka on noin 11 MJ/kg. Kostean biojätteen poisto nostaa polttoarvoa paremmaksi, mutta ei riittävästi ollakseen taloudellisesti järkevää erottaa kuitu sekajätteestä poltettavaksi.

9.2 Lähtömassan siistattavuus

Kuitumassan siistattavuutta voitiin arvioida simuloimalla siistausprosessia laboratoriomittakaavassa (Ingede 11). Tärkeimmät laatuparametrit siistattavuuden arviointiin olivat luminenssi eli Y-arvo, CIE-väriarvot sekä massan sisältämät likapartikkelit. Y-arvon sijasta usein seurataan myös ISO-vaaleutta.

Pulperoinnin jälkeen massan suodoksista mitatut pH:t olivat 9,3 ja 9,4. Arvot olivat sallittujen virherajojen sisässä ($9,5 \pm 0,2$). Näyte laimennettiin 45 -asteisella hanavedellä noin 1 % sakeuteen, mikä pysäytti kemialliset reaktiot.

Flotatoidusta massasta valmistetuista arkeista saadut analyysitulokset on koottu taulukkoon 5. Havaitaan sekä Y-arvosta että vaaleusarvoista kuitumassan olevan hyvin tummaa. Siistausmassan ISO-vaaleuden tavoitearvo on noin 60 %, ja flotaatiolla sekajätteestä erotetulle kuidulle saavutettiin ainoastaan 30 % vaaleus. Saatu vaaleus oli yllättävän matala verrattaessa esimerkiksi uusiomassaan, jonka lähtövaaleus ennen prosessointia on jo noin 45 %.

Myös CIE-väriarvot ovat vertailuarvojen ulkopuolella. Massa on silmämääräisestikin punertavan ruskeaa, mitä ilmoittaa CIELAB –värikartan a-arvo. Ingeden vertailuarvon vaihtelualue a-arvolle on -2 - +1, ja siistaus nosti ylärajalla olleen arvon 1,5:een, eikä massa täytä laatuvaatimuksia siltäkään osin. L arvo ilmoittaa massan harmaasävyjä ja b sinisen ja keltaisen sävyjä.

Taulukko 5. Sekajätekuitumassan siistattavuuden arviointi analysoitujen laatuparametrien vertailun avulla.

Analysoitu parametri	Siistaamaton kuitumassa	Siistattu kuitumassa	Vertailuarvot (Ingede)
Flotaation saanto [%]		68	
Kuitusaanto [%]		74	
Y-arvo	34,3	37,0	>60
ISO-vaaleus [%]	27,1	30,2	
L	65,2	67,2	
a	1,0	1,5	-2 – +1
b	11,5	13,2	
Musteen poistuminen, IE		15	> 70 %
ERIC ₇₀₀	920	780	
Likapilkut			
>50 µm [mm ² /m ²]	8 600	5 100	<600
>250 µm [mm ² /m ²]	5 800	3 500	<180
Tuhka (525 °C) [%]	19,8	13,6	
Tuhka (900 °C) [%]	15,4	10,2	

Musteen poistuminen massasta oli vähäistä, vain 15 %. Syynä tähän voi olla ikääntyneet painopaperit, sillä näytteen seassa oli esimerkiksi paljon lähes kaksi vuotta vanhaa sanomalehteä. Muste on tällöin tarttuneena kuituihin huomattavasti tiukemmin ja vaatii irrotukseen muita osaprosesseja. Esimerkiksi dispergoinnilla on mahdollista irrottaa

mustepartikkeleita ja muita epäpuhtauksia. Myös massan tummuminen voi olla osasy syy korkeaan ERIC₇₀₀ -arvoon.

Likapilkkujen määrä näytteessä oli korkea vielä siistauksen jälkeen. Pinta-alana arkista yli 50 µm kokoista likaa oli 8600 mm²/m² ennen siistausta ja 5100 mm²/m² siistauksen jälkeen. Erikokoista likaa poistui siis noin 40 % eli huomattavan paljon, mutta tavoitetasolla Ingeden siistattavuutta arvioivan pistetaulukon mukaan oltaisiin vasta alle 600 mm²/m².

Tämän kokeen perusteella voidaan helposti todeta, ettei kyseinen massa ole siistattavaa, eikä näin ollen soveltu käyttökohteisiin, mitkä edellyttävät korkeaa vaaleutta.

9.3 Sekajätekuidun erilaisten prosessointivaihtoehtojen vertailu

Kuidun ominaisuudet muuttuvat kierrätyksessä huomommiksi useiden jauhatusten sekä toistuvien kuivatusten vuoksi. Kierrätyskuitua voidaan kierrättää noin 3-5 kertaa, jonka jälkeen kuidun laatu on jo heikentynyt ja sen soveltuvuus pakkaus- ja paperiteollisuuden käyttöön on rajoitetumpaa. Sekajätekuidun laatuominaisuuksien selvittämiseksi työhön valittiin tarkasteltavaksi ja vertailtavaksi siistauksen osaprosesseja, kuten painelajittelu sekä flotaatio.

Pulperointi tehtiin rinnakkain kahdella eri tavalla varmistuen niiden vaikutuksista sekajätteen kuitufraktiolle. Kahden eri pulperointitavan eli märkähajotuksen sekä korkeasakeuspulperoinnin vaikutus selvitettiin hajotuksen jälkeen kummastakin otetun näytteen kuitujakauman ja kuidun keskiarvopituuden määrittämisellä. Kaikkiin muihin tutkimuksen osaprosesseihin käytettiin ainoastaan korkeasakeuspulperoitua näytettä siten, että prosessoidun näytteen hyväksytyt jae analysoitiin ja prosessoitiin edelleen.

9.3.1 Laboratoriomärkähajotuksen ja korkeasakeuspulperoinnin vaikutukset kuidun pituuteen

Tässä koejärjestelyssä pyrittiin kahdella eri hajotusmenetelmällä varmistumaan siitä, ettei kuidun pituus poikkea prosessoinnin alkuvaiheessa hajotusmenetelmän valinnan vuoksi. Työssä julkaisemattomien tulosten perusteella oli nähtävissä mahdollisuus, että märkähajotus olisi ollut liian voimakas hajotusmenetelmä sekajätteestä erotetulle kuidulle, mikä viittaisi kuidun heikentymiseen mikrobiologisen toiminnan vuoksi.

Kuidun pituus ensimmäisessä tutkitussa näyte-erässä oli verrattain lyhyttä. Tämä näyte-erä oli hajotettu mekaanisesti märkähajotuksella 2,5 % sakeudessa. Keskiarvopituus näytteessä oli vain 0,75 mm ja ISO-standardin mukainen pituus oli 1,03 mm. (ISO-standardissa huomioidaan ainoastaan >200 µm:n kuidut) Jos kuitu on kovin heikentynyttä, on mahdollista, että märkähajotuksessa kuitu vahingoittuu ja ei kestä katkeilematta.

Toisesta jätekuituerästä otettu näyte käsiteltiin kahtena rinnakkaisena samalla tavoin muuten, mutta toinen näyte hajotettiin märkähajotuksella ja toinen näyte hajotettiin kemikaalien avulla korkeasakeuspulperoinnilla. Näistä jakeista analysoitiin kuitupituudet putkivirtausfraktionatorilla. Keskimääräinen kuitupituustulos (ISO) näissä näytteissä oli tasainen. Märkähajotuksella hajotetussa näytteessä 0,960 mm, korkeasakeuspulperoinnilla hajotetussa näytteessä 0,980 mm ja referenssikuitunäytteessä 1,04 mm. Pituuspainotettu keskiarvo, missä on mukana myös alle 200 µm:n kokoinen hienoaines oli vastaavassa järjestyksessä 0,640 mm, 0,670 mm ja 0,850 mm.

Näistä tuloksista voi päätellä kuidun hajotustavan olevan merkityksetön kuidun pituuden kannalta. Märkähajotus ei ole hajottanut kuitua lyhyemmäksi, vaikka aiemmat tutkimukset toisesta näyte-erästä antoivat siihen viitteitä. On kuitenkin mahdollista, että hienoaineksen suurempi määrä sekä pienentynyt kuidun keskipituus myöhemmin tehdyssä toisessa jätekuituerässä olisi seurausta mikrobitoinnin etenemisestä. Tulokset 1,03 mm (ISO) ja 0,75 mm ovat 5–10 % paremmat kuin myöhemmin saadut 0,960 mm (ISO) ja 0,670 mm, vaikka kyseessä on vastaavasti käsitelty, sama näyte-erä.

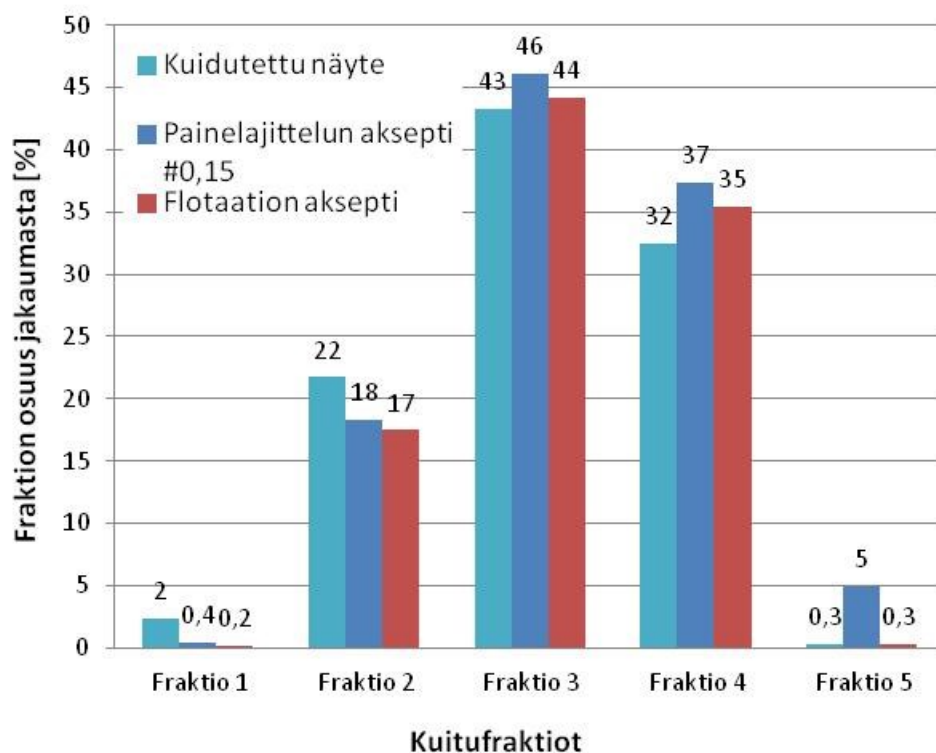
9.3.2 Painelajittelun ja sen jälkeisen flotaatiovaiheen vaikutus kuitujakaumaan

Alkalisissa olosuhteissa korkeasakeuspulperoitu näyte lajiteltiin painelajittimella #0,150 mm sihtikorin avulla. Painelajittimelta saadusta akseptinäytteestä analysoitiin kuitujakauma, jotta nähtäisiin mahdolliset erot kuitupituuksissa verrattaessa lajittelemattomaan jakeeseen. Kuvassa 16 on esitetty kuitujakauma fraktioittain. Havaitaan, että fraktiota 1 eli kuituuntumatonta materiaalia on enää < 2 % jäljellä painelajittelun jälkeen, mutta hienoainesta on paljon. Kuituuntumaton, karkea materiaali siis lajittui hyvin pois painelajittelussa. Lajittelun jälkeen pitkää kuitua oli 18 %, lyhyttä kuitua >75 % ja hienoainesta noin 5 %.

Fraktio 2 sisältää pitkää kuitua eli keskiarvopituus oli siinä noin 2,05 mm. Pitkän kuidun fraktion osuus pienenee hieman jokaisessa prosessivaiheessa. Tämä voi johtua siitä, että kuitu ei kestä prosessointia ja katkeilee tai jauhautuu hienoksi, jolloin lisääntynyt hienoaineen määrä laskee keskiarvopituutta.

Lyhyttä kuitua sisältävät fraktiot 3 ja 4 (keskiarvopituudet 1,10 mm/ 0,70 mm) ovat pitoisuudeltaan suuremmat painelajittelun jälkeen. Kaaviosta nähdään flotaatiossa tapahtuva kuituhäviö, mikä johtui ilmansyötön paineen mukana ylijuoksutuksena rejektiin joutuneesta kuitujakeesta. Flotaation kuituhäviö oli noin 30 % kuiva-aineesta.

Fraktio 5 sisältää hienoainesta, eli kuidun keskiarvopituus on alle 0,40 mm. hienoaineksen määrä on suurin painelajittelun akseptissa. Flotaatioon jälkeinen hienoainesosuus on pieni, sillä flotatointia varten näytettä oli sakeutettava suodattamalla, minkä vuoksi hienoainesta menetettiin.



Kuva 16. Kuitujakauma fraktioittain eri prosessointivaiheissa.

Painelajittelussa jokaiselle massatyypille on olemassa optimilajittelusakeus. Liian pieni sakeus huonontaa lajittelutulosta koska kuituverkkoa ei pääse syntymään. Tällöin sakeuden nosto aikaansaa akseptin, jonne ei päädy niin paljon epäpuhtautta. Liian suuri sakeus taas pienentää lajittelutehokkuutta.

Kun lajittelun syöttönopeutta nostettiin, kuidut päätyivät helposti akseptiin ilman lajittimen tukkeutumisen vaaraa. Valittu sihtikori olisi voinut olla pienemmällä rakokoolla oleva, jolloin se olisi soveltunut tälle kuitumassalle paremmin. Tässä työssä päädyttiin kuitenkin pitämään valittu sihtikori, sillä 0,150 mm sihtikori on kuitenkin teollisuudessa yleisesti käytetty. Lajittelun sihtikorin rakonopeuden ollessa myös normaali, ei pienemmän sihtiraon omaavan korin vaihtamiseen päädytty. Päätettiin laskea syöttönopeutta, jotta saatiin erotettua myös rejektiin karkeaa ainesta.

Lajittelusakeudeksi asetettu 0,6 % saattoi olla liian pieni tälle massalle huonontaen kuitujen lajittumista. Sakeuden optimointeja kuitenkin ei tässä työssä ehditty tekemään, joten mitään varmaa sakeuden noston vaikutuksesta lajittumiseen ei voida sanoa.

Taulukkoon 6 on kerätty eri prosessivaiheista otettujen kokonaiskuitunäytteiden keskiarvoinen kuitupituus sekä leveys. Lc(l) tarkoittaa pituuspainotettua keskiarvoa, Lc(n) aritmeettista keskiarvoa, Lc(w) paino-painotettua keskiarvoa ja Lc(l) ISO tarkoittaa ISO-standardin mukaista keskiarvoa eli siihen on huomioitu ainoastaan yli 200 µm:n pituiset kuidut. Kuidun leveys on ilmoitettu yksikössä [µm].

Taulukko 6. Eri prosessivaiheista mitatut keskiarvoiset kuitupituudet

Tunnus	Kuidun pituus [mm]				Kuidun leveys [µm]
	Lc(l)	Lc(n)	Lc(w)	Lc(l) ISO	W
Kuidutettu massa	1,003	0,587	1,520	1,037	17,560
Painelajittelun aksepti	0,971	0,577	1,452	1,005	17,050
Flotaation aksepti	0,950	0,557	1,437	0,987	17,023

Taulukosta havaitaan, että kuidun pituuspainotettu keskiarvopituus pienenee prosessivaiheiden edetessä. On vaikea arvioida, onko tässäkin kyseessä ainoastaan prosessivaiheiden aiheuttama kuidun katkeileminen, kun oletuksena on, että rakenne on heikkoa. Hienoaineksen määrän kasvu ei vaikuta ISO-standardin mukaiseen keskiarvoon.

9.3.3 Painelajittelun ja flotaation vaikutus musteen, likapilkkujen ja tahmojen poistumiseen

Korkeasakeuspulperoidun näytteen painelajittelun jälkeinen aksepti siirrettiin flotaatiovaiheeseen, missä tavoitteena oli puhdistaa massaa likapilkuista, tahmoista ja painoväreistä. Seuraavissa kappaleissa on tarkasteltu prosessointivaiheiden vaikutuksia analysoituihin laatuparametreihin.

Likapilkut

Likapilkut analysoitiin prosessivaiheiden akseptijakeesta. Likapilkkujen määrän analysoinnissa huomioitiin 15 % taustaa tummempien kohteiden määrä ja pinta-ala. Massan seassa olevat ruskeat, valkaisuamattomat kuidut olivat paikoin hyvin selvästi taustastansa erottuvia ja kuva-analyysi saattoi mahdollisesti tulkita myös osan näistä virheellisesti likapartikkeleiksi. Tätä virhettä kompensoitiin valitsemalla ensimmäisen skannauksen jälkeen kuvankäsittelyn kontrastiero samaksi vertailtavilla arkeilla.

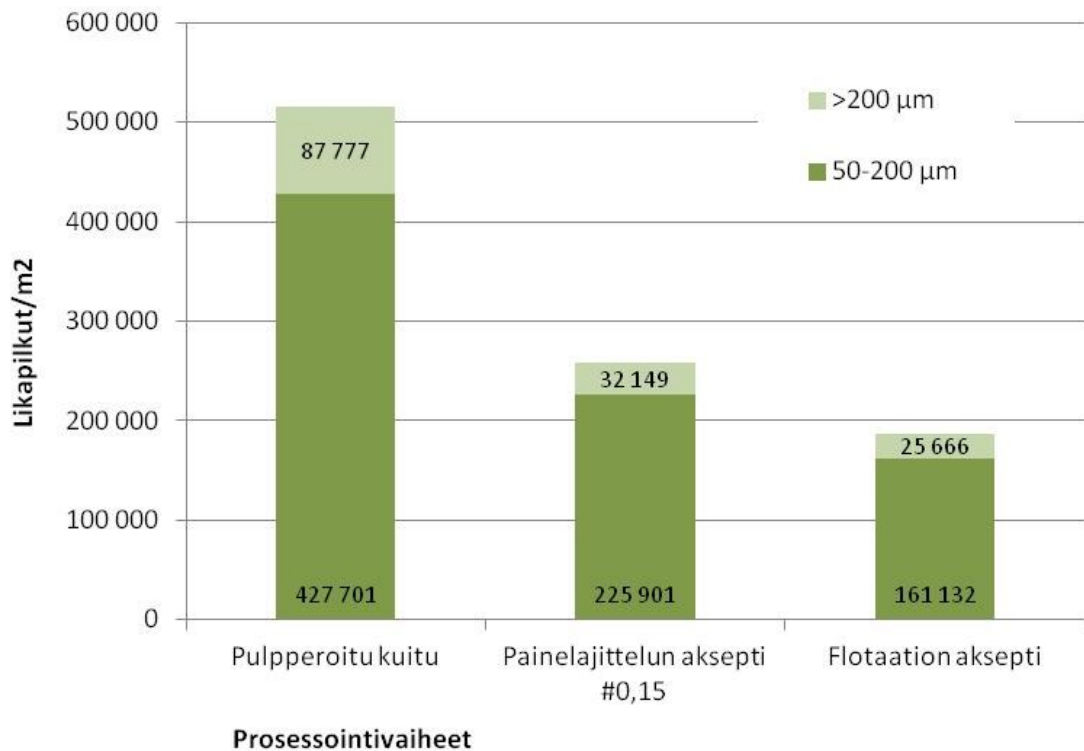
Kuvassa 17 on valokuvat laboratorioarkeista, joista ensimmäinen on valmistettu suoraan korkeasakeuspulperoidusta massasta ja toinen arkki on valmistettu painelajittelun sekä sen jälkeisen flotaatiosiistauksen akseptista. Ero likapartikkeleiden määrässä on merkittävä ja silmin havaittava. Paljain silmin tarkasteltaessa pinta-alaltaan suuremmat likapilkut ovat helpommin havaittavissa.



Kuva 17. Erilaisia likapartikkeleita korkeasakeuspulperoidussa näytteessä (vas.) sekä saman kuitunäytteen painelajitellussa sekä flotatoidussa akseptissa (oik.)

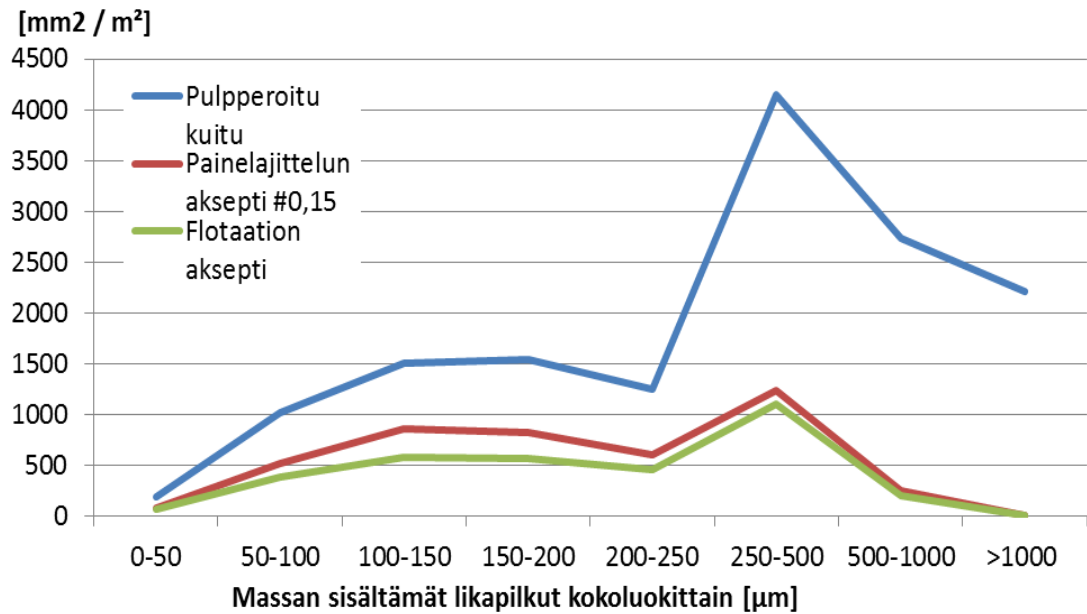
Likapartikkeleista suuri osa poistui painesihtilajittelussa, mutta myös flotaatiossa poistui erityisesti pienempikokoista likaa. Kuvassa 18 on esitetty likapartikkeleiden kokonaislukumäärät eri prosessointivaiheissa sekä pienikokoisen 50–200 µm ja

suuremman $< 200\mu\text{m}$ lian suhteet. Likapartikkeleiden kokonaislukumäärä väheni lähtömassan noin 515 000 kappaleesta painelajittelun vaikutuksesta puoleen, 260 000 kappaleeseen. Suurikokoista likaa lähti suhteessa paljon enemmän. Flotaatiossa likaa saatiin poistettua edelleen, mutta enemmän poistui pienempikokoista likaa. Likapilkkujen lukumäärän kokonaismuutos painelajittelussa oli 50 %. Flotaatiovaiheen aikaansaama väheneminen likapilkkujen määrässä oli noin 28 %.



Kuva 18. Likapartikkeleiden lukumäärä sekajätekuitumassassa eri prosessivaiheiden jälkeen.

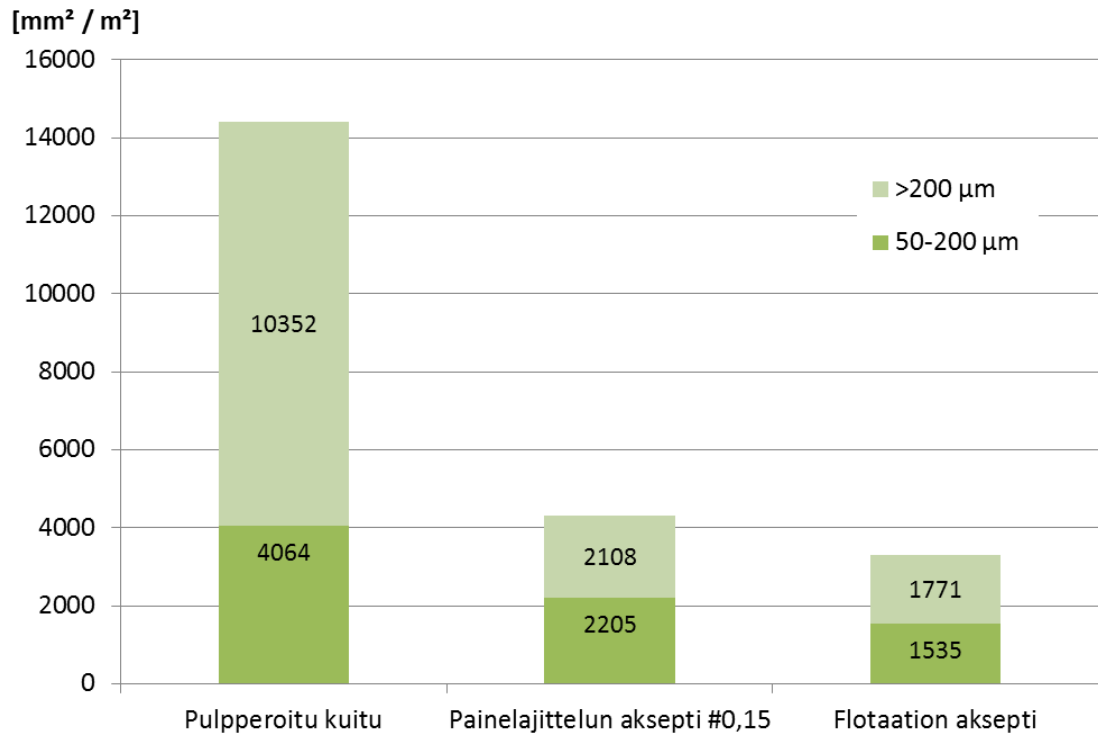
Kuvan 19 kaaviossa on esitetty likapartikkeleiden pinta-ala eri kokoluokittain. Likapartikkeleiden poistumista massasta voidaan tarkastella myös erikokoisten jakeiden suhteen. Kaaviosta nähdään esimerkiksi pienikokoisten, 50–100 μm , likapartikkeleiden pinta-ala, joka on noin 1000 mm^2 . Painelajittelun jälkeen tämän kokoluokan likapilkkujen pinta-ala on puolittunut 500 mm^2 :iin. Selkein muutos on kokoluokassa 250–500 μm , missä saatiin poistettua likaa pinta-alaltaan yli 4000 mm^2 :stä 1000 mm^2 :iin. Samoin sitä suurempaa $>500\mu\text{m}$ likapartikkelia poistui merkittävästi.



Kuva 19. Erikokoisten likapartikkeleiden pinta-ala näytearkista eri prosessointivaiheissa

Kuvassa 20 on esitetty likapartikkeleiden kokonaispinta-ala jokaisessa prosessivaiheessa. Eriteltyä on myös eri prosessivaiheissa tapahtunut muutos kahdessa eri kokoluokassa (50–200 µm sekä >200 µm). Tästä kuvasta helposti nähdään suurikokoisen lian määrän väheneminen. Lähtötilanteessa kokonaispinta-ala oli 14400 mm² ja painelajittelun jälkeen 4300 mm² ja flotaation jälkeen ainoastaan 3300 mm². Likapilkkujen väheneminen pinta-alassa mitattuna on suuri, jäljellä on noin 23 % prosessoimattoman näytteen likapilkuista.

Pienikokoinen lika on todennäköisesti hiekkaa ja muuta pientä kiviainesta. Osa hienosta hiekasta poistui painelajittelussa jäädessä sihtikorin ulkopuolelle päätyttä kuitenkin rejektivirtaan. Hiekan ja kiviaineksen puhdistaminen massasta onnistuisi parhaiten tiheyteen perustuvalla lajittelulla esimerkiksi pyörrepuhdistimella.

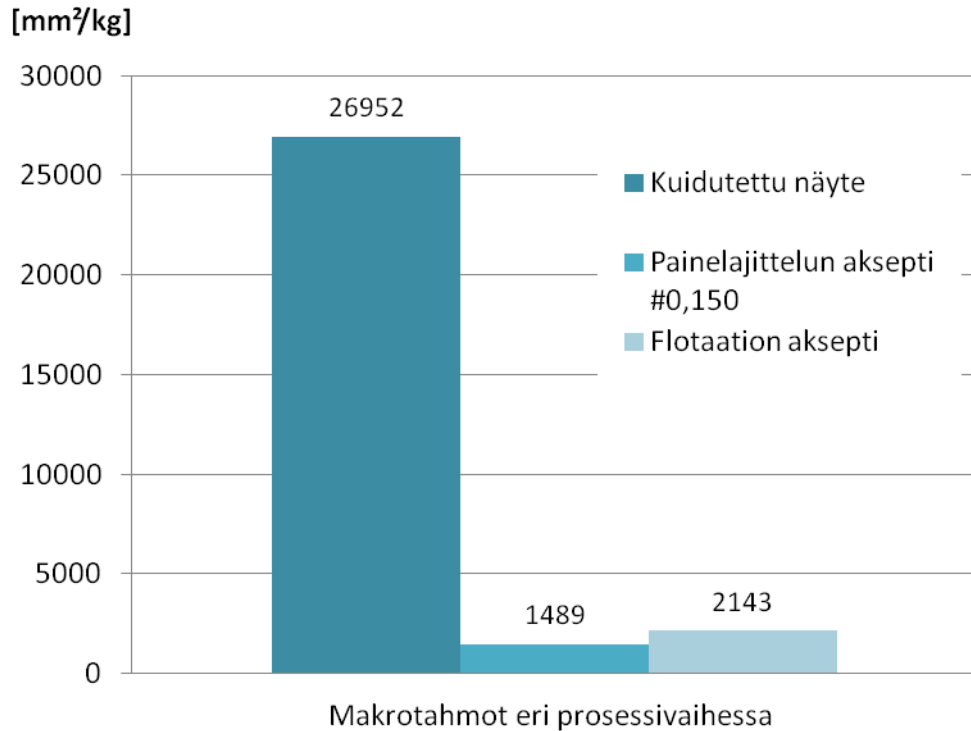


Kuva 20. Likapartikkeleiden kokonaispinta-ala näytearkista esitettynä kahdessa eri kokoluokassa sekä prosessointivaiheiden vaikutus.

Tahmot

Sekajätteestä erotetusta kuidusta analysoitiin makrotahmot, joiden runsas lukumäärä massassa estää prosessoinnin paperikoneilla. Kuvassa 21 esitetään makrokokoisten tahmojen määrän väheneminen pinta-alana näytteestä. Havaitaan, että kuidutetussa näytteessä alun perin oleva noin 27 000 mm²/kg putoaa painelajittelun vaikutuksesta 1500 mm²/kg eli makrotahmoja on jäljellä noin 5 % alkuperäisestä pinta-alasta.

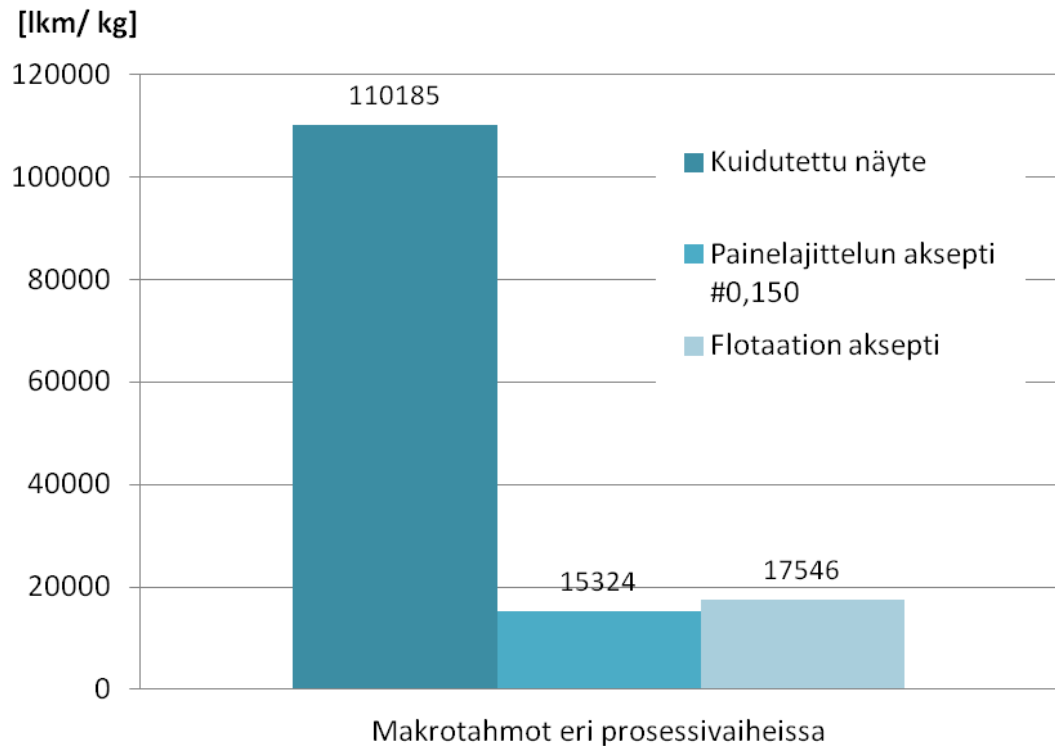
Tässä tutkimuksessa ei selvitetty sitä, ovatko tahmot vapaana vai kiinnittyneenä muihin yhdisteisiin. Kuituihin tahmot tarttuvat hyvin heikosti ja yleensä irtoavatkin kuidusta jo pulperoinnin aikana. On kuitenkin löydetty yhteys vaaleuden ja tahmojen määrän poistumisessa flotatoinnin aikana. Vaaleutta laskevien partikkeleiden sekä tahmojen poistumisen on todettu korreloivan, mikä viittaisi niiden olevan kiinnittyneenä ligniiniin tai painoväreihin. Toinen, yhtä todennäköinen teoria on se, että samankaltainen poistuma flotatoinnin aikana perustuu vain sekä painovärien että tahmojen hydrofobiseen luonteeseen.



Kuva 21. Makrokokoisten tahmojen määrä kokonaispinta-alana näytteestä.[mm²/kg]

Makrotahmojen ollessa alle 5000 mm²/kg, näytteen katsotaan ERPC:n (*European Recovered Paper Council*) tahmojen poistumista ja kierrätettävyyttä arvioivan pistetaulukon mukaan olevan kierrätykseen kelpaava. Hyvällä kierrätettävyydellä tarkoitetaan keräyskuidun helppoa prosessoituvuutta uudelleen käytettäväksi massaksi. Kuvasta 21 nähdään painelajittelun jälkeisen kuituakseptin laadun tahmojen osalta olevan hyvä. Tahmojen pinta-ala on noin 1500 mm²/kg, mikä on reilusti alle kierrätettävyyden rajan.

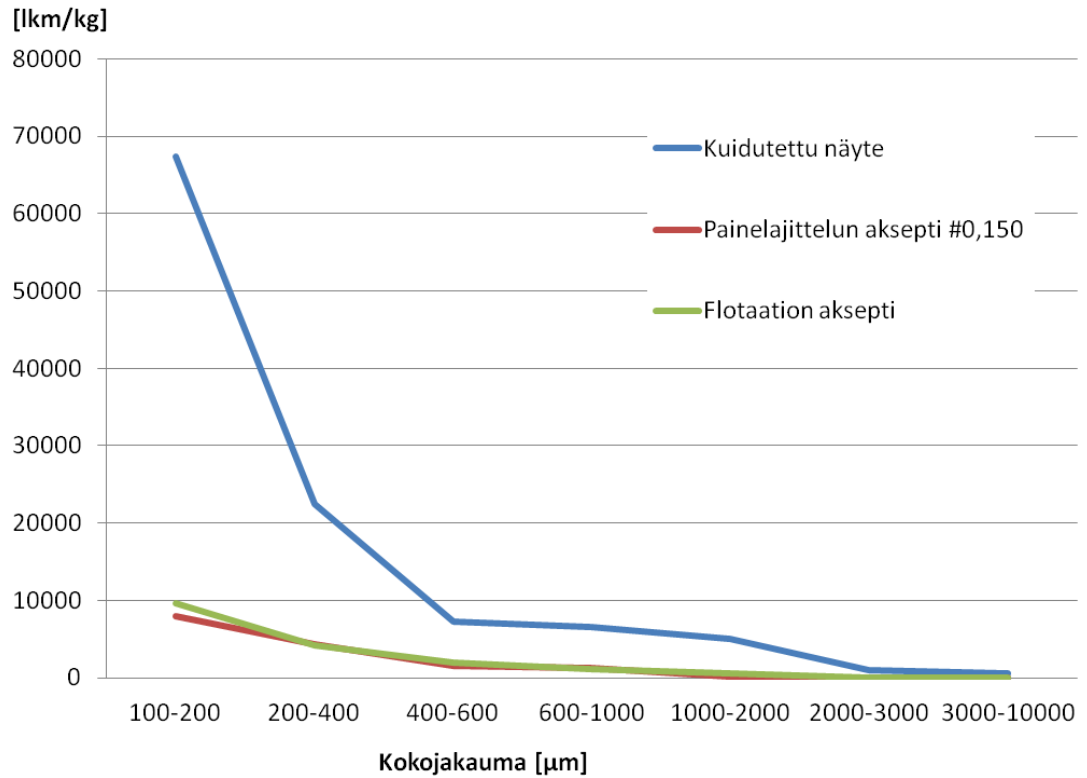
Kuvassa 22 on esitetty makrotahmojen kokonaislukumäärä lähtömassassa, joka oli noin 110 000/kg. Painelajittelun jälkeen tahmojen määrä oli enää 15 000 kappaletta näytekiloa kohden. Makrotahmojen lukumäärä väheni alle 15 prosenttiin alkuperäisestä näytteestä. Lukumääräinen poistuma on vaikeampi silmin havaita, sillä suurin osa poistuneesta liasta on hyvin pienikokoista.



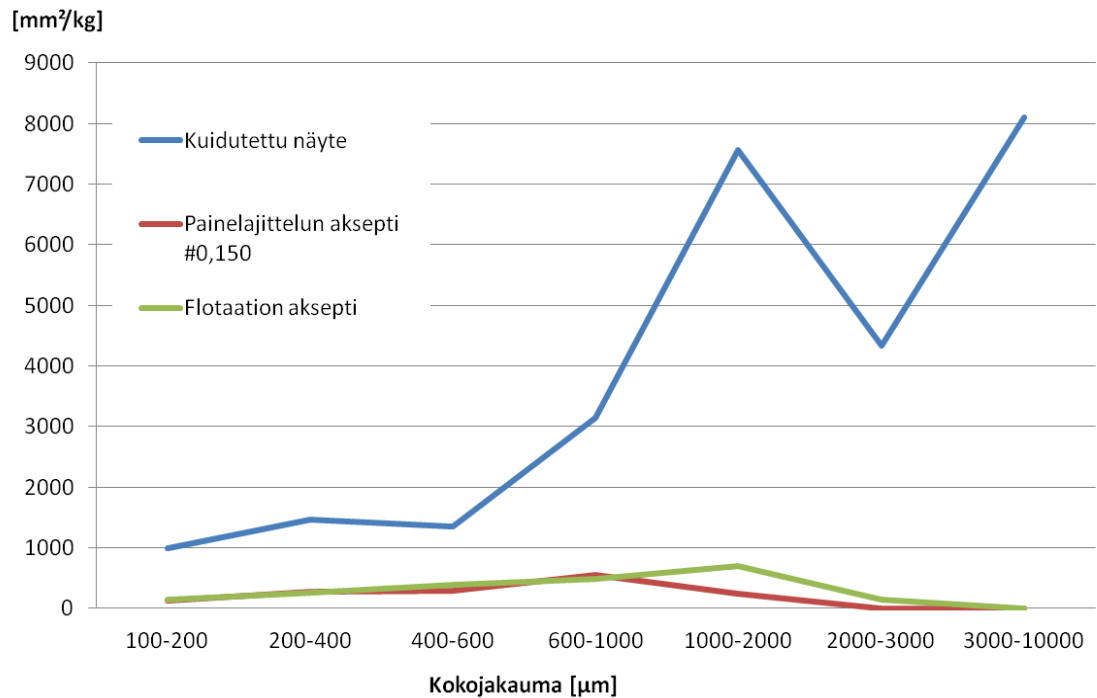
Kuva 22. Makrokokoisten tahmoaineiden kokonaislukumäärä näytekiloa kohden. [no./kg]

Tahmojen poistuminen lukumääräisesti on tehokkainta pienimmässä kokoluokassa eli $<600 \mu\text{m}$. (Kuva 23) Lukumäärällisesti pientä tahmoa on paljon ja siksi poistuminen näyttää suurelta. Yhtä tärkeää on myös saada poistettua pinta-alaltaan suurikokoisempi tahmoaines, joka on ongelmallisempaa jatkoprosesseissa paperikoneilla. Myös suurikokoinen tahmoaines saadaan poistumaan tehokkaasti, minkä todetaan myös onnistuvan kuvassa 24 olevan kuvaajan perusteella.

Sekajätekuidun prosessointi onnistuu makrotahmojen poistumisen osalta hyvin. Tahmojen määrä putoaa alle kierrätyskelpoisuuden rajan, joka on siis Ingeden kierrätettävyyttä arvioivan pistetaulukon mukaan tahmojen osalta alle $5000 \text{ mm}^2/\text{kg}$.



Kuva 23. Makrokokoiset tahmoaineet sekajätekuidussa ja niiden poistuma prosessoinnin aikana eri kokoluokittain ilmoitettuna



Kuva 24. Makrokokoiset tahmoaineet sekajätekuidussa pinta-alana näytteestä eri prosessointivaiheissa

9.4 Paperiteknisen potentiaalin selvittäminen

9.4.1 Prosessoidun sekajätekuidun lujuusominaisuudet

Painelajittelusta sekä sen jälkeen flotatoidusta kuitumassasta saadusta akseptijakeesta otettiin näyte analysoitavaksi. Paperiteknisen potentiaalin selvitystä varten kuitumassasta valmistettiin arkkeja, joista analysoitiin lujuusominaisuudet sekä optiset ominaisuudet. Arkkien tekoon käytettiin näytettä, joka oli korkeasakeuspulperoitu ja prosessoitu edelleen lajittelemalla sekä flotatoimalla. Flotaation aksepti jauhettiin PFI:llä ennen arkitusta. Jauhatus on tavallisesti käytetty menetelmä paperinvalmistuksessa ja sen vaikutus on yleensä positiivinen vetolujuuteen, mutta pidemmälle jauhettuna kuitu menettää repäisylujuusominaisuuksia. Se kuinka nopeasti repäisylujuus laskee, viittaa kuidun rakenteen lujuuteen ja sen käyttäytymiseen jauhatuksessa.

Tässä työssä jauhatusta aloitettiin standardin mukaisesti 3000 kierroksella, jolloin kuituaines hajosi niin hienoksi, ettei arkin teko arkkimuotilla onnistunut. Päädyttiin jauhamaan näytettä ainoastaan 500 kierrosta ja vertaamaan sitä jauhamattomaan näytteeseen. Taulukossa 7 on esitetty koottuna saadut tulokset jauhamattomalle kuitumassalle sekä 500 krs jauhetusta massasta tehdyille arkille.

Taulukko 7. Lujuusmittaustulokset kahdessa eri jauhatusasteessa

PFI-jauhatuskierrokset	0	500
Puhkaisulujuus (ISO 2758)		
Puhkaisulujuus [kPa]	72,5	76,1
s [kPa]	4,31	5,95
v [%]	5,95	7,82
Puhkaisuindeksi, X [kPa*m ² /g]	1,1	1,2
Murtoherkkyys [%]	5	5
Repäisylujuus (ISO 1975)		
Repäisylujuus [mN]	226	195
s [mN]	5	3
Repäisyindeksi [mN*m ² /g]	3,43	3,07
Vetolujuus (ISO 1924-2)		
Vetoindeksi [kNm/kg]	30,46	35,92
Venymä [%]	1,26	1,19
Murtotyö [J/kg]	294,4	306,3
Jäykkyys [MNm/kg]	7,04	7,89
Katkeamis pituus [km]	3,07	3,66
Neliömassa [g/m ²]	65,9	63,6
Paksuus [µm]	122	109
Arkin tiheys [kg/m ³]	549,2	578,2

Puhkaisulujuudessa sekä vetolujuudessa havaittiin pientä muutosta parempaan jauhatuksen vaikutuksesta. Puhkaisulujuus parani 500 krs jauhatusteossa noin 5 % ja vetolujuus noin 18 %, mikä on lupaava tulos, mutta repäisyjuuden heikkeneminen jo 500 kierroksen jauhatuksen jälkeen lähes 14 % on hälyttävä merkki kuidun laadusta. Tämä tulos viittaisi siihen, että kuidun laatu olisi heikentynyt mikrobiologisen toiminnan takia, sillä tavallisesti jauhatusvaihe fibrilloi kuitua hyvin lujittaen kuitujen sitoutumista ja arkin lujuusominaisuudet paranevat.

Näissä mittauksissa selvitettiin sekajätteestä erotetun kuidun lujuuden lähtötasoa. Näihin lujuuksiin on mahdollista päästä hyvin vähällä prosessoinnilla. Tähän ei otettu varsinaista referenssiä mukaan ja se tekee tulosten arvioinnin vaikeaksi. Kuidun kestävyttä ja jauhatuksen vaikutuksia kuituun selvitetään tarkemmin seuraavassa kappaleessa, missä lujuusmittausten tuloksia on tarkennettu käyttämällä referenssinä puhdasta uusiokuitua rinnalla.

9.4.2 Sekajättekuidun lujuusominaisuuksien vertailu kierrätyskuidun lujuuteen

Lujuusmittauksissa selvitettiin kuidun heikentymistä vertaamalla sekajätteestä erotettua kuitua puhtaaseen, ilman mikrobikontaminaatiota olleeseen kuitunäytteeseen. (kuva 13 kappaleessa 7.2) Tavoitteena oli verrata sekajättekuidun lujuusominaisuuksia referenssinä toimivaan keräyskuituun, jotta ero mikrobitoiminnan vaikutuksista näkyisi selvemmin ja kuitulujuuden maksimitaso olisi helpompi nähdä.

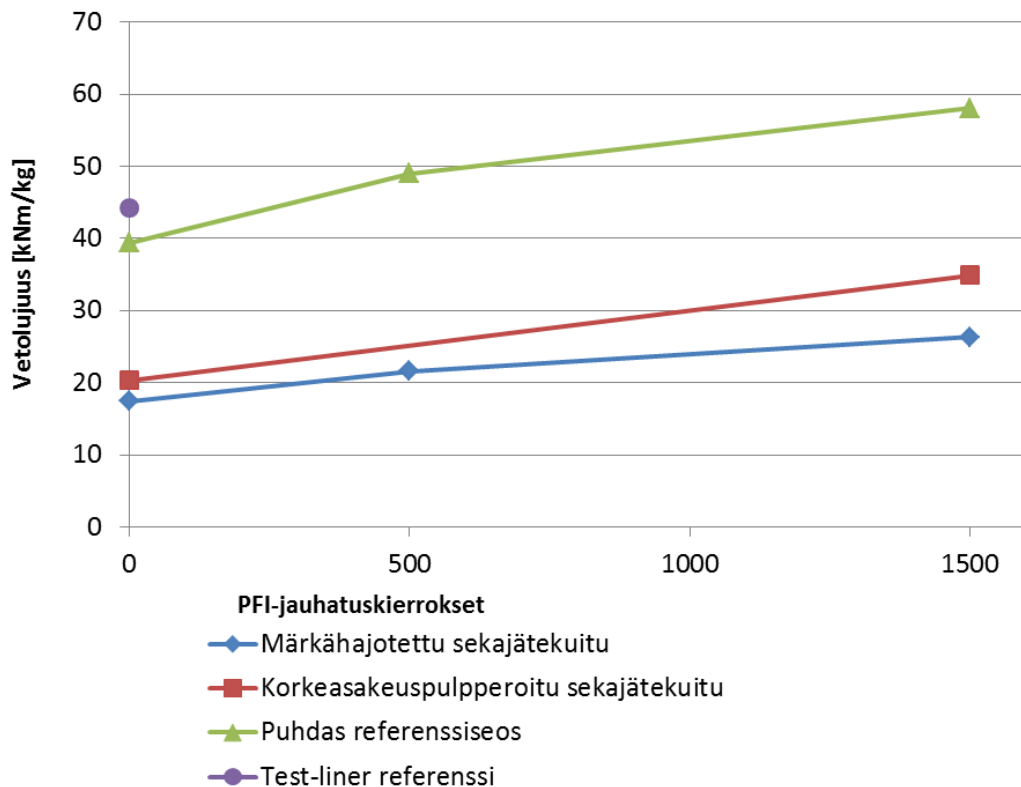
Samasta näyte-erästä koottua kuituainesta hajotettiin sekä korkeasakeuspulpperoinnilla että märkähajotuksella. Tällä pyrittiin samalla löytämään tietoa kuidun laadusta. Jos kuitu olisi heikentynyt mikrobihajotuksen tuloksena, se ei kestäisi märkähajotuksen voimakasta sekoitustakaan katkeilematta. Näytteiden käsittelyyn yhdistettiin PFI – jauhatus eri kierroksilla. Referenssikuituseosta sekä mekaanisesti hajotettua sekajättekuitua jauhettiin 0, 500 ja 1500 kierrosta. Korkeasakeuspulpperoitua sekajättekuitua jauhettiin 0 ja 1500 kierrosta. Test-liner –referenssimassaa arkitettiin ainoastaan jauhamattomana.

Vetolujuus

Vetolujuus paranee tavallisesti jauhatusteoksen lisääntyessä. Tämä ilmiö nähdään myös tutkituissa sekajättekuidun ja referenssikuidun lujuuksissa. Eroa jo lähtölujuuksissa on kuitenkin huomattavasti. Vetolujuus sekajättekuidulla, hajotustavasta riippumatta,

jauhamattomassa näytteessä oli noin 20 kNm/kg, kun vastaavan ”puhtaan” referenssinäytteen vetolujuus oli 39,4 kNm/kg. Test-linerin vetolujuus oli paras, 44,2 kNm/kg. Kuvassa 25 on esitetty vetolujuuden kehittyminen eri jauhatusteasteissa.

Havaitaan, että vetolujuus kasvaa kaikilla näytteillä jauhatuksen vaikutuksesta tasaisesti. Referenssimassalla 1500 kierroksen jauhatuksen jälkeen vetolujuus on 58 kNm/kg. Märkähajotetun kuidun vetolujuus 1500 kierroksen jauhatuksen jälkeen oli 26,4 kNm/kg ja korkeasakeuspulperoidun kuidun vetolujuus hieman parempi ollen 34,9 kNm/kg. Huomataan, että korkeasakeuspulperoidun kuitumassan lujuus kasvaa jauhatuskierrosten lisääntyessä suhteessa enemmän (72 %) kuin mekaanisesti hajotetun massan lujuus (51 %).



Kuva 25. Vetolujuuden kehittyminen eri jauhatusteasteissa.

Vetolujuus ei yllä jauhetunakaan edes referenssimassan lähtötasolle. Vetolujuutta vaativiin kohteisiin, kuten pakkausmateriaaleihin, ei tässä työssä tutkitun sekajätteestä erotetun kuidun lujuus riitä.

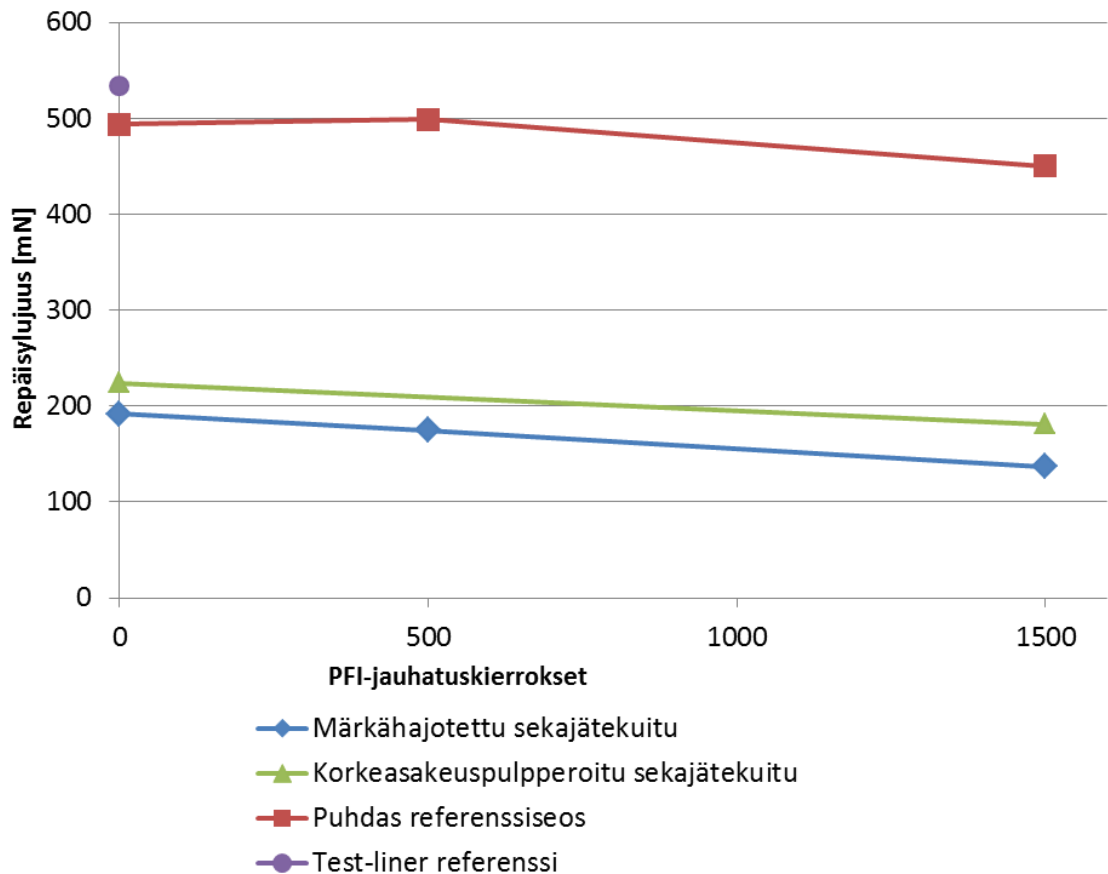
Repäisylujuus

Repäisylujuus mitattiin kolmessa eri jauhatusteossa olevista näytteistä. Tulokset on esitetty kuvassa 26. Referenssikuidun repäisylujuus ylsi lähes samaan kuin test-liner –referenssikuidun lujuus. Jauhamattomien referenssinäytteiden lujuudet olivat 494 mN (kierrätyskuituseos) ja 534 mN (test-liner –pahvi). Sekajätteestä erotetun kuidun repäisylujuus oli sen sijaan jauhamattomanakin yli puolet heikompi referensseihin verrattuna. Korkeasakeuspulperoitunut kuitu oli repäisylujuudeltaan 224 mN ja märkähajotuksella kuidutetun näytteen repäisylujuus oli 192 mN. Lähtötilanteen eli jauhamattomien näytteiden repäisylujuuksissakin oli siis jo suuri ero. Sekajätteestä erotetun, märkähajotetun kuidun repäisylujuus oli yli 60 %, ja korkeasakeuspulperoidun kuidun 55 % huonompi kuin referenssin repäisylujuus jauhamattomissa näytteissä.

Jauhatuskierrosten lisääntyessä repäisylujuus heikkeni kaikissa näytteissä, mikä johtuu kuidun lyhenemisestä ja hienoaineen lisääntymisestä näytteessä. Tämä on tavallinen ilmiö jauhatuksessa repäisylujuusominaisuuksissa. Mutta verrattaessa kuinka nopeasti jauhatuksen vaikutus repäisylujuudessa tulee näkyviin, huomattiin selvä ero eri näytteissä. Lujuus heikkeni referenssikuituseoksessa vain 8,9 % kun jauhatuste oli 1500 krs. Korkeasakeuspulperoidun näytteen repäisylujuus heikkeni 1500 kierroksen jauhatuksessa 19,2 % ja mekaanisesti kuidutetun näytteen lujuus jopa 28,6 %.

On myös huomattava, että 500 kierroksen jauhatusteossa ei referenssikuidun repäisylujuus huonone vielä lainkaan. Sekajätteestä erotetulla kuidulla repäisylujuuden heikentyminen alkaa heti jo pienessäkin jauhatusteossa. Tämä on seurausta kuidun heikosta rakenteesta ja kuitupituuden lyhenemisestä.

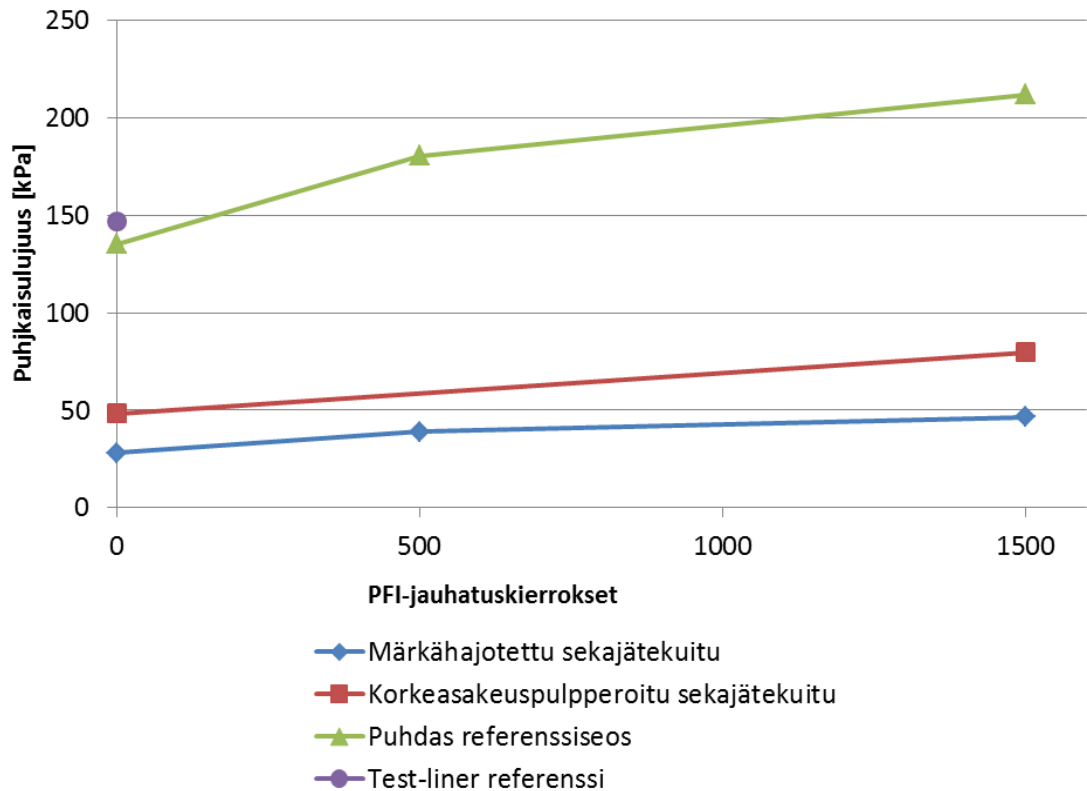
Repäisylujuuden nopea heikkeneminen jauhatuksen vaikutuksesta viittaa sekajätekuidun heikkoon lujuuteen ja fibrillien katkeiluun, jolloin kunnollista kuituverkostoa ei pääse syntymään ja lujuusominaisuudet huononevat. Repäisylujuutta tarvitaan erityisesti esimerkiksi voimapaperissa tai taivekartonkipakkauksissa. Test-liner, joka valmistetaan osaksi kierrätyskuidusta ja osaksi neitseellisestä kuidusta on myös repäisyominaisuuksistaan hyvää. Sekajätteestä erotetun kuidun lujuusominaisuudet ovat selvästi heikommat repäisylujuuden osalta, joten se vaatisi joukkoon pitkäkuituisempaa neitsytkuitua, mikä voisi parantaa repäisyvastusta.



Kuva 26. Repäisylujuuden heikentyminen eri jauhatusasteissa

Puhkaisulujuus

Kuvassa 27 on esitetty puhkaisulujuus eri näytteillä 0, 500 sekä 1500 kierroksen jauhatusasteissa. Puhkaisulujuudet jauhamattomissa näytteissä lähtötilanteessa olivat test-linerilla 147 kPa ja referenssikuituseoksella 135 kPa. Korkeasakeuspulperoidun massan lähtölujuus oli noin 48 kPa ja mekaanisesti hajotetun massan lujuus 30 kPa. Puhkaisulujuus oli noin 64 % tai 78 % referenssiä heikompi hajotustavasta riippuen. Kaikilla 500 krs tai 1500 krs jauhetuilla näytteillä puhkaisulujuus kasvoi jauhatuksen vaikutuksesta. Referenssikuidun puhkaisulujuus parani 1500 kierroksen jauhatuksella 56,7 % arvoon 211,8 kPa. Korkeasakeuspulperoidun sekajätekuidun puhkaisulujuus kasvoi yllättäen suhteessa enemmän (66 %) ollen lopussa 79,8 kPa. Mekaanisesti hajotetun kuidun loppulujuus 1500 krs jauhatuksen jälkeen oli vain 46,3 kPa, vaikka kasvua olikin 54 %.



Kuva 27. Puhkaisulujuuden lisääntyminen jauhatuksen vaikutuksesta

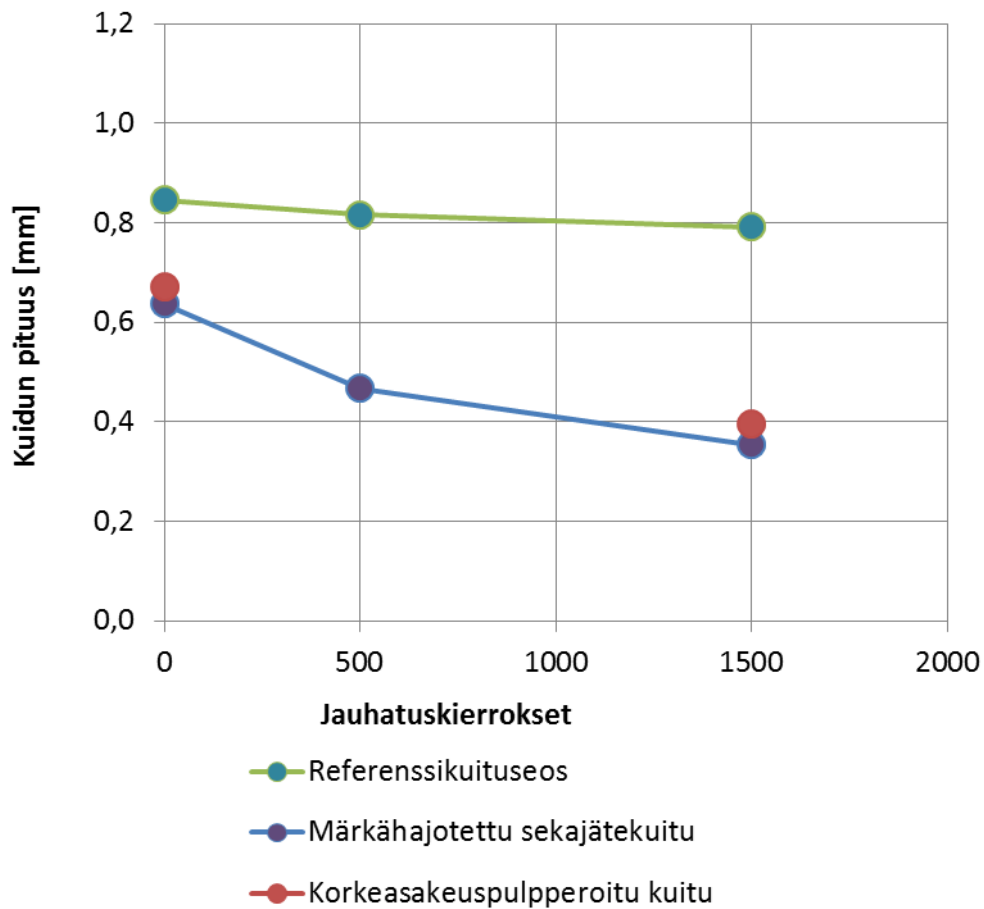
Puhkaisulujuus analyysimenetelmänä antaa hyvän yleiskuvan kuidun lujuudesta, kun testataan soveltuvuutta esimerkiksi pakkausmateriaaliksi. Tehdyissä mittauksissa puhkaisulujuus jauhamattomana oli yli puolet heikompi kuin referenssinä käytetyllä kierrätyskuituseoksella, eikä lujuus jauhettunakaan parantunut merkittäväälle tasolle.

9.4.3 Kuitupituuksien vertailu eri jauhatusteissa

Kuitujen kokojakauma-analyysissä käytettiin kahdella eri tavoin hajotettua massaa, josta oli hienoainesta poistettu hyperpesulla 105 µm viiralla. Muuta puhdistusvaihetta ei tehty. Kuitujakauma määritettiin kolmena rinnakkaisena määrittämisnä, joiden keskiarvojen mukaan on muodostettu alla olevat kuvaajat 28 ja 29.

Kuvassa 28 on kuitunäytteiden pituuspainotetut keskiarvopituudet eli niissä on huomioitu todellinen kuitujakauma. Kuitunäytteiden lähtöpituus jauhamattomissa näytteissä on eri referenssikuidulla sekä sekajätekuidulla, mikä johtuu siitä, että keskiarvopituuden arvoa laskee mukana oleva pienikokoinen, alle 200 µm kokoinen aines, jota on sekajätekuidussa selvästi enemmän. Jauhmaton referenssikuitu on keskipituudeltaan 0,850 mm, korkeasakeuspulperoitu sekajätekuitu 0,670 mm ja

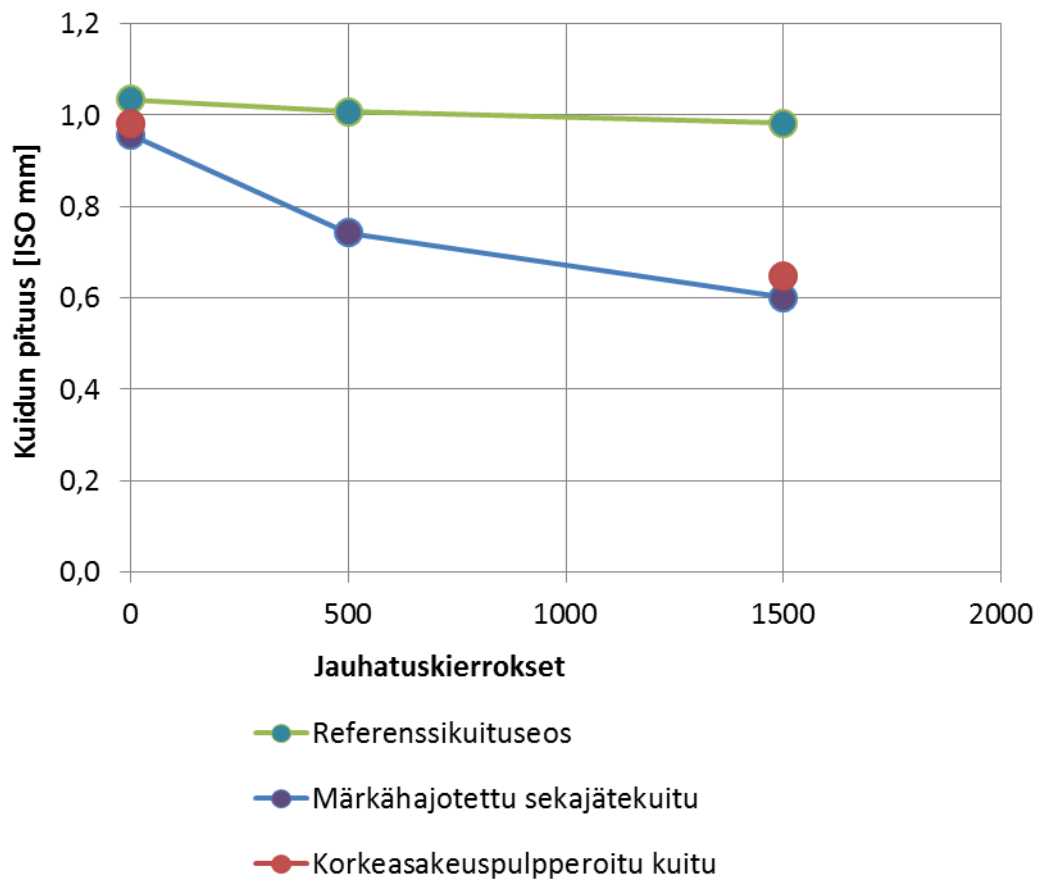
märkähajotettu sekajätekuitu 0,640 mm. 1500 kierroksen jauhatuksen jälkeiset kuitupituudet ovat vastaavasti 0,790 mm, 0,400 mm ja 0,350 mm.



Kuva 28. Kuidun pituuspainotettu keskiarvopituus eri jauhatusteissa.

Kuidun ISO-pituudella tarkoitetaan pituuspainotettua keskiarvopituutta kuidulle siten, että alle 200 µm kuidut on jätetty huomioimatta. Kuvassa 29 on kuitujen ISO-pituudet eri jauhatusteissa. Kuidun lähtöpituus eri näytteillä on lähes sama. Referenssinä olevan kierrätyskuituseoksen ISO-pituus on 1,04 mm, korkeasakeuspulperoidun sekajätekuitun 0,980 mm ja mekaanisesti hajotetun sekajätekuitun 0,960 mm. Kuitenkin jo 500 kierroksen PFI-jauhatusteissa ero on huomattava. Referenssikuidun ISO-pituus on pysynyt käytännössä muuttumattomana (1,01 mm), mutta märkähajotetun sekajätekuitun keskipituus on enää 0,740 mm. Korkeasakeuspulperoidulle kuitumassalle 500 kierroksen jauhatusta ei tehty. 1500 kierroksen jauhatuksen jälkeen referenssikuidun ISO-pituus on edelleen hyvä (0,980 mm), mutta selvästi nähdään jauhatuksen voimakas vaikutus sekajätekuituun. Kuidun pituus on märkähajotetulla sekajätekuidulla 0,600 mm ja korkeasakeuspulperoidulla kuidulla

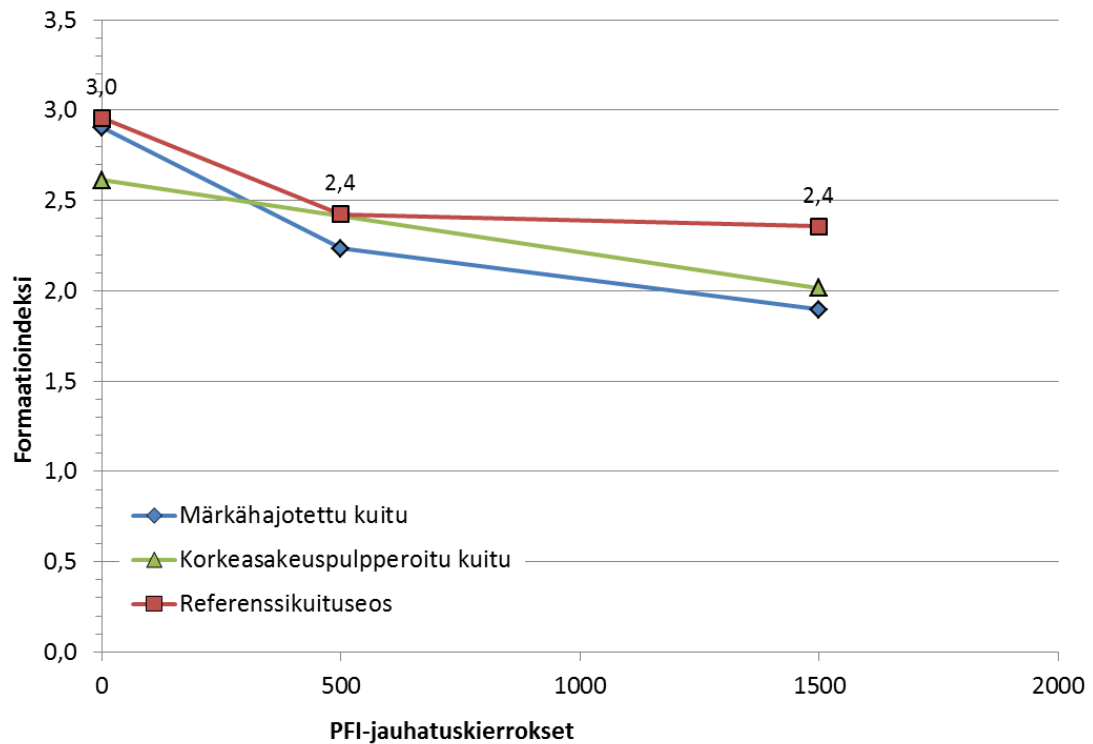
0,650 mm. Tämä viittaa selkeästi siihen, että kuidun laatu on heikkoa ja yksittäisen kuidun lujuus on huono. Tyypillisesti 1500 kierroksen jauhatuksen ei pitäisi vahingoittaa kuitua näin merkittävästi, vaan sitä käytetään standardimenetelmänä paperinvalmistuksessa.



Kuva 29. Kuidun pituuspainotettu ISO-pituus eri jauhatusteissa.

9.4.4 Arkin formaatio

Lujuusmittauksia varten valmistetuista arkeista määritettiin myös formaatio eli kuitujen flokkiutuminen arkituksessa. Tasainen formaatio mahdollistaa painotuotteiden tasalaatuisen painojäljen sekä hyvän ajettavuuden jo paperinvalmistusvaiheessa. Kuvassa 30 on esitetty tutkittujen näytteiden formaation tulokset kuvaajana. Mukaan analyysiin otettiin korkeasakeuspulperoitu sekajätteestä erotettu kuitu sekä märkähajotettu sekajätekuitu ja referenssiksi märkähajotettu referenssikuituseos. Referenssikuituseos ja märkähajotettu sekajätteen kuitu on jauhettu 500 sekä 1500 krs, mutta korkeasakeuspulperoitu näyte on ainoastaan 1500 krs jauhatusteissa. Kuvaaja kulkee muista poikkeavaa linjaa 500 krs mittapisteen puuttuessa.



Kuva 30. Sekajättekuidun formaatioindeksi eri jauhatusteissa.

Formaatioindeksi kuvaa kuidun tasaista jakautumista tutkittavalle arkille. Sekajätteen kuidun alhaisempi formaatioindeksi johtuu massan lyhytkuituisuudesta. Erot formaatiossa eivät ole merkittäviä lähtötilanteessa, mutta jauhatuksen aikaansaama kuidun katkeilu parantaa sekajättekuidun formaatiota 1500 krs jälkeen. On huomattava, ettei referenssikuidun formaatiossa tapahdu muutosta suuremmissa jauhatusteissa.

9.4.5 Peroksidivalkaisun teho jätekuitumassalle

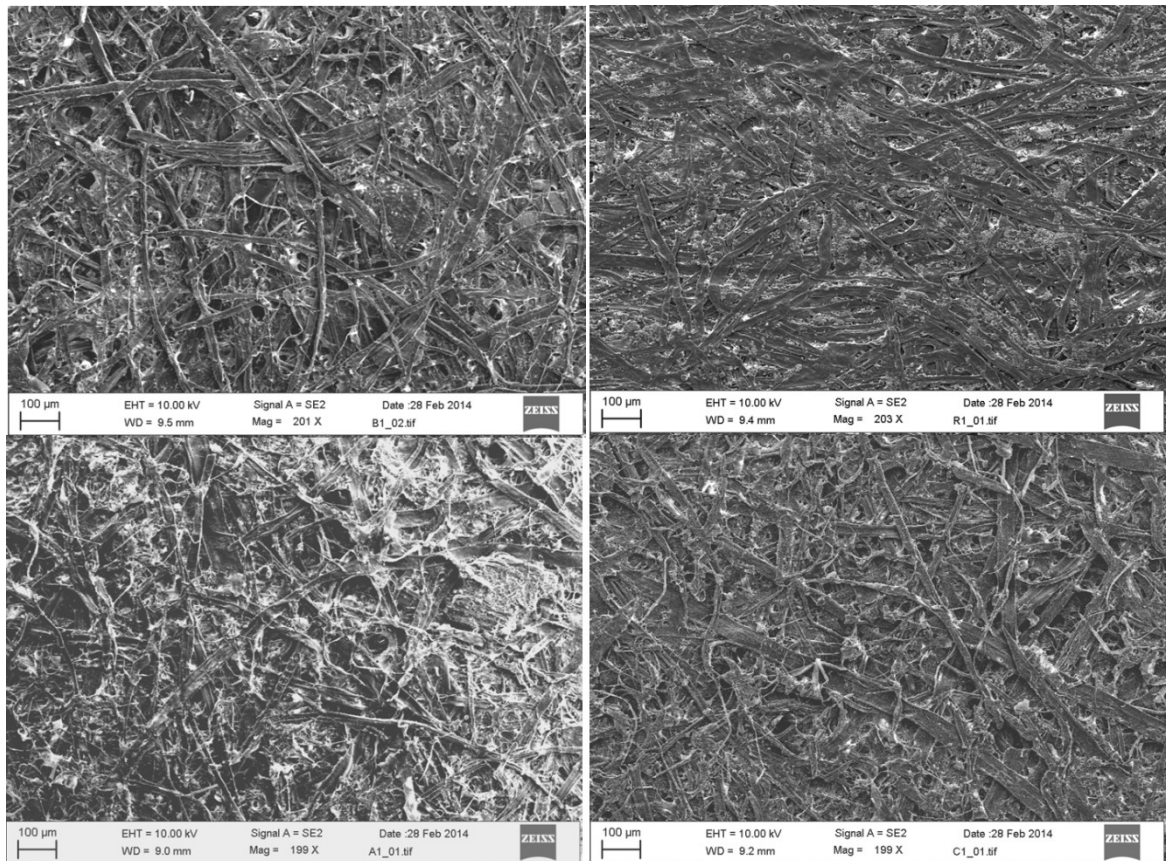
Peroksidivalkaisua testattiin prosessoidulle sekajättekuidulle, joka oli painelajiteltu sekä flotatoitu. Sekajätteestä erotettu kuitumassa oli väriltään hyvin tummaa, joko kellertävän ruskeaa tai jopa harmahtavaa. Kuitumassan valkaisu 2 % vetyperoksidilla vaalensi massan ISO-vaaleutta ainoastaan 4 %.

Valkaisun tulisi onnistua jo optimiannostusta (2 %) alhaisemmassa annostuksessa, mutta tässä työssä testattiin jopa 4 % vetyperoksidiannostelua, mikä ei myöskään tuonut merkittävää muutosta ISO-vaaleuteen. Näin suuri annostus ei olisi taloudellisesti edes kannattavaa. Voidaan tämän tutkimuksen tuloksen perusteella todeta, että vetyperoksidivalkaisun teho tutkitun jätekuitumassan valkaisuissa ei ole riittävä, jotta vaaleus saataisiin nostettua uusiokuitumassan tavoitetasolle.

9.4.6 FESEM -kuvien vertailu

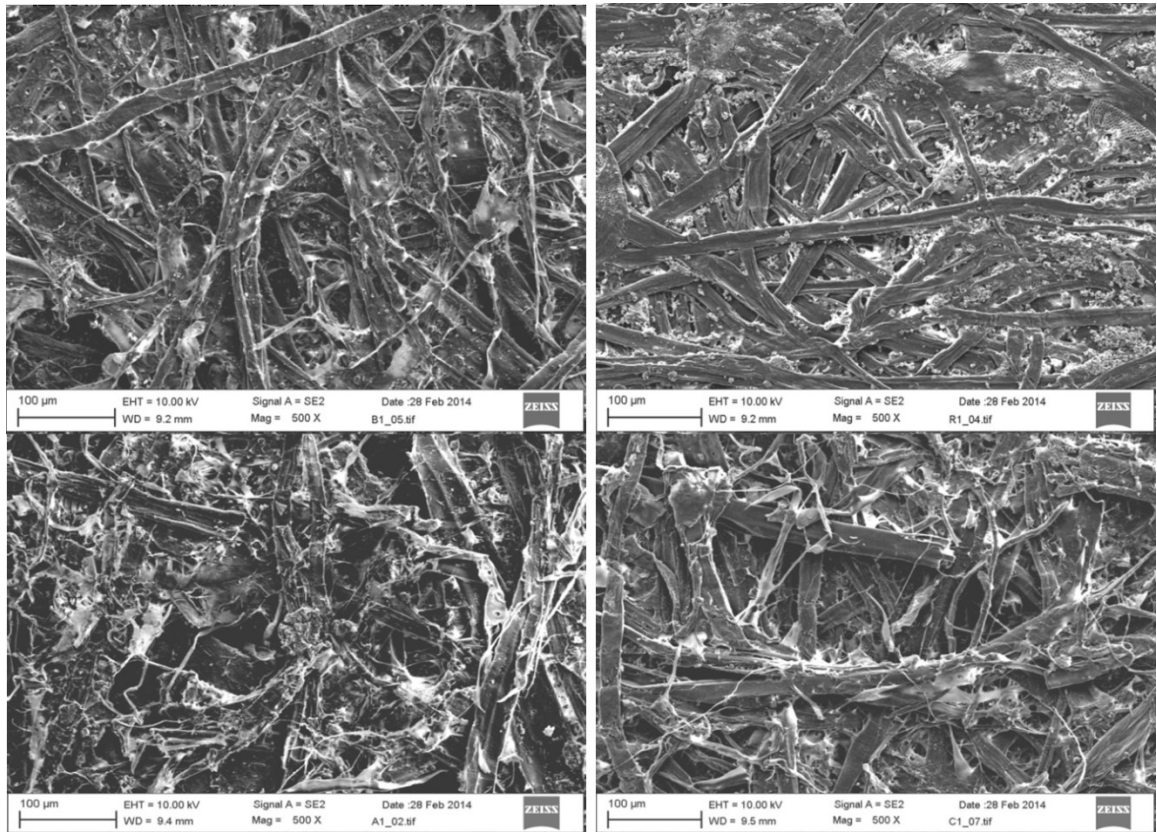
FESEM -kuvat otettiin arkeista, jotka valmistettiin vastaavasti kuin lujuusmittauksissa tutkitut arkit. Kuitujaetta ei prosessoitu muuten, kuin hajottamalla kahdella eri menetelmällä ja sakeuttamalla kuitunäyte suoraan PFI-jauhatukseen. FESEM -kuvien avulla pyrittiin tarkastelemaan laboratorioarkkien pinnanmuotoja sekä kuitujen verkottumista. Referenssinä käytettiin puhtaasta kierrätyskuiduista tehtyä arkkia sekä mielenkiinnon vuoksi myös valmista kopiopaperia. Kopiopaperissa puukuidut muodostavat tiiviin monikerroksisen verkon, jonka lisäksi täyteaineet sekä päällysteaineet aikaansaavat hyvin tasaisen pinnan. Kuvissa verrataan jauhamattomia näytteitä sekä 1500 krs jauhettuja näytteitä eri suurennoksilla.

Ensimmäisissä kuvissa 31 ja 32 on jauhamattomasta näytteistä tehdyt arkit esitettynä 200 –kertaisella (kuva 31) suurennoksella sekä 500 –kertaisella (kuva 32) suurennoksella. Kuituverkoston havaitaan kuvissa olevan korkeasakeuspulpperoidussa, jauhamattomassa massassa tasaisemmin muodostunut kuin mekaanisesti hajotetussa massassa. Mekaanisen massan kuitujen seassa näyttää olevan paljon irronnutta materiaalia, joka voi olla esimerkiksi kuitujen palasia. 200-kertaisella suurennoksella vertailtuna jokaisen näytteen kuituverkottuminen vaikuttaa asettuvan hyvin, vaikka mekaanisesti hajotetussa massassa on vaikea nähdä kuitujen asemoitumista runsaan muun aineksen vuoksi. Sitä, onko kuitujen kosketuskohtien välille syntynyt kemiallisia sidoksia, jotka pitävät kuituverkosta koossa, on mahdoton sanoa näiden kuvien perusteella.



Kuva 31. FESEM-kuva (200x suurennos) referenssikuidusta tehdystä arkista (vas.ylh.), kopiopaperiarkista (oik.ylh.), mekaanisesti märkähajotuksella kuidutetusta massasta tehdystä arkista (vas.alh.) sekä korkeasakeuspulperoidusta massasta tehdystä arkista (oik.alh.). Kuitu on kuvissa jauhamatonta.

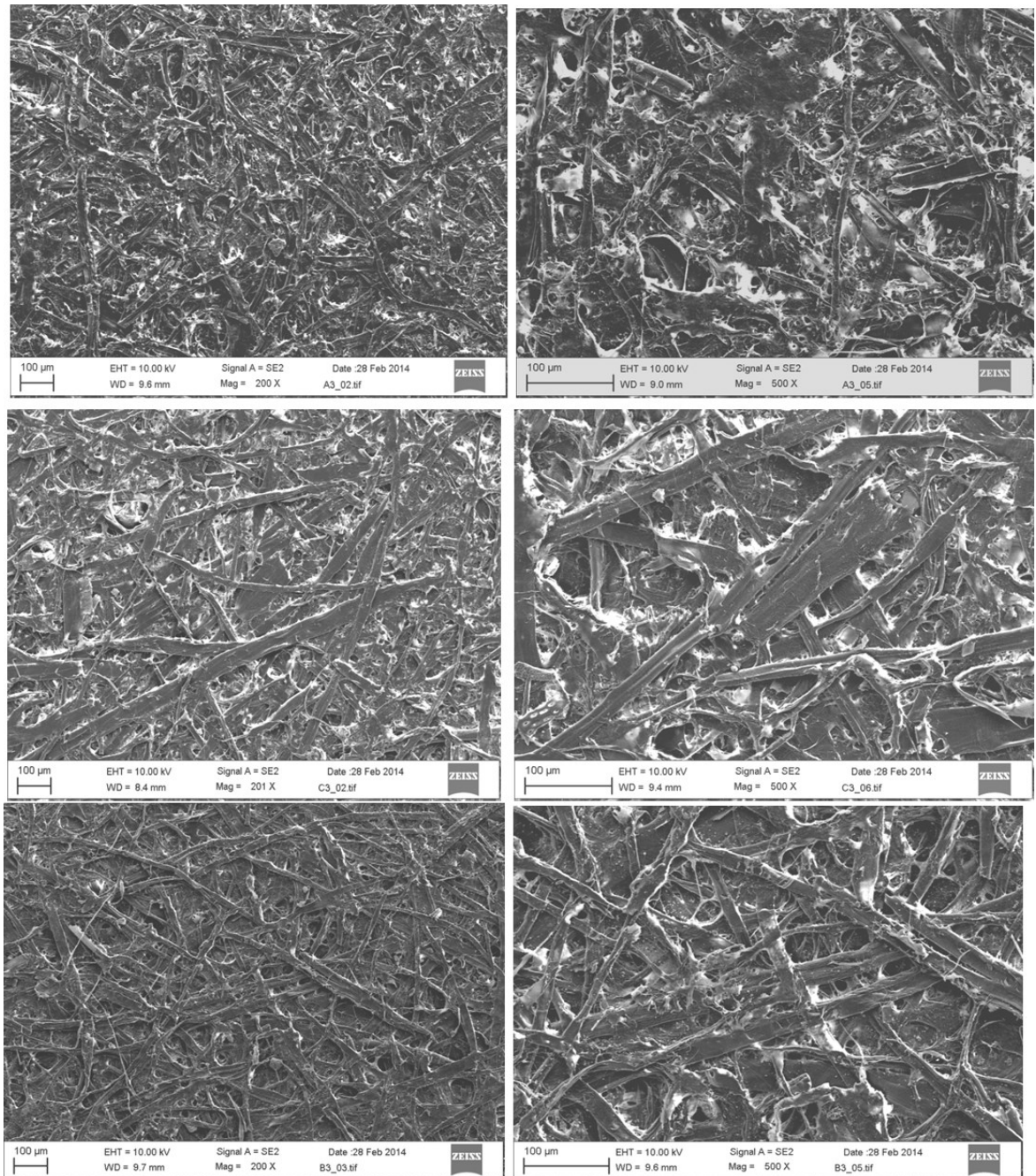
Tarkastelemalla kuvaa 32 ei vielääkään kuidun laadussa pystytä näkemään eroja, vaikka suurennos on 500 –kertainen. Mekaanisesti hajotetun massan kohdalla voi olla nähtävissä muita enemmän hienoainesta. Referenssimassa (kuvassa 32 vasemmalla ylhäällä) on myös lajitelma kierrätyskuitua, jonka kierrätysastetta ei tiedetä. Myös jauhatuvaiheiden määrä on tuntematon. Mahdolliset erot eri näytteiden kuiduissa voivat johtua joko toistuvista kuivaus- ja pulperointivaiheista tai mikrobiologisesta hajoamisesta, mitä ei yksittäisten kuvien perusteella voida todeta. Kuvia tarkempaa tietoa voitaisiin saada analysoimalla kuitunäytteen selluloosan ja hemiselluloosan määrää referenssissä ja biologisesti mahdollisesti hajonneessa näytteessä.



Kuva 32. FESEM-kuva (500x) referenssikuidusta tehdystä arkista (vas.ylh.), kopiopaperiarkista (oik.ylh.), mekaanisesti märkähajotuksella kuidutetusta massasta tehdystä arkista (vas.alh.) sekä korkeasakeuspulpperoidusta massasta tehdystä arkista(oik.alh.). Kuitu on jauhamatonta.

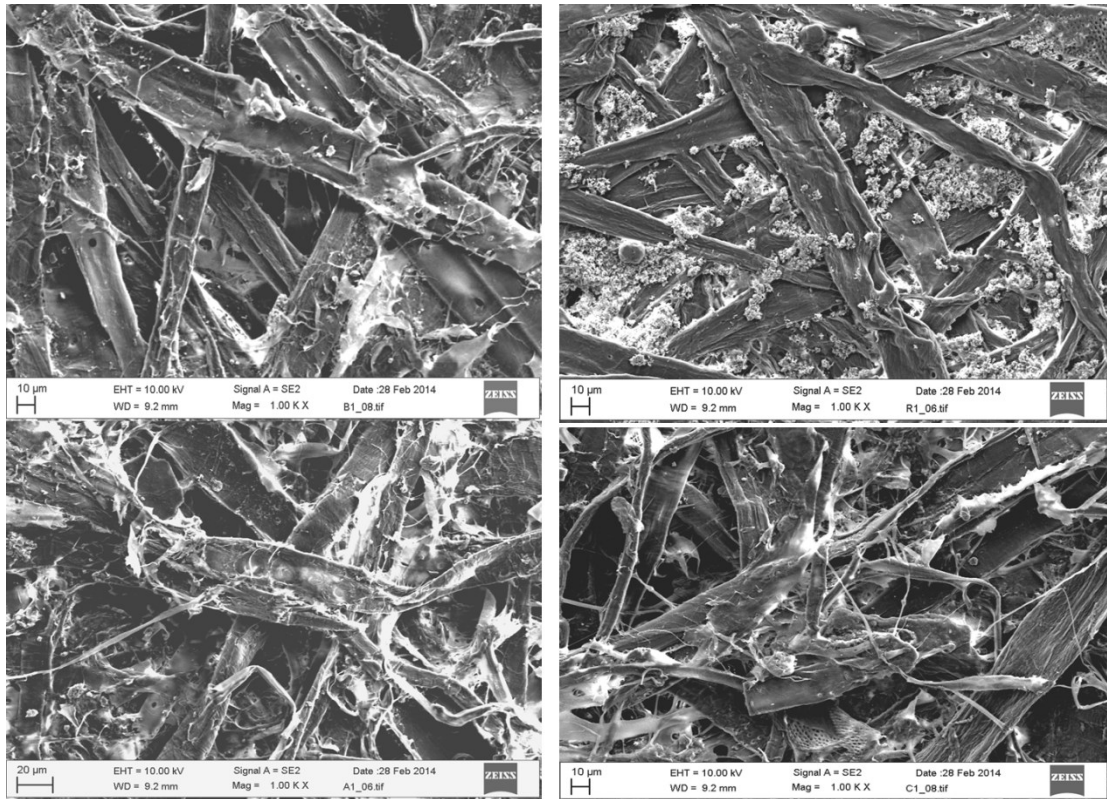
Kuvassa 33 esitetään samat kuitunäytteet 200-kertaisella ja 500-kertaisella suurennoksella, kun näytteitä on jauhettu 1500 kierrosta Havaitaan, että mekaanisesti hajotetun ja alkalisissa olosuhteissa korkeasakeuspulpperoidun jätekuidun välillä on eroa kuidun pituudessa. Mekaanisesti hajotettu massa on jauhatuksessa menettänyt pitkää kuitua selvästi enemmän verrattaessa korkeasakeuspulperoituuun massaan. Mekaaninen hajotus on tässä tapauksessa kuidulle hieman rajumpi ja jauhatusvaihe rikkoo lisää kuitua, mikä todennäköisesti on myös syynä heikompiin lujuusominaisuuksiin. Kuidun pituuden lyheneminen jauhatuksen vaikutuksesta näkyi myös kuitujakauma-analyysissä, joiden tuloksia on käsitelty kappaleessa 9.4.3.

Referenssikuituseos fibrilloituu hyvin 1500 kierroksen jauhatuksessa eikä kuidun pituus ole lyhentynyt. Sen sijaan sekajätekuidun fibrilloituminen ei ole yhtä selvää ja hyvää, vaan kuitujen pinnat näyttävät suurimmaksi osin sileiltä. Joko fibrilloitumista ei ole tapahtunut, tai fibrillit ovat katkenneet. Lisäksi mekaanisesti hajotetun massan seassa on jotain liiman tapaista partikkelia.



Kuva 33. FESEM-kuva PFI:llä 1500 kierrosta jauhetuista näytteistä. Vasemmassa sarakkeessa 200x suurennoksella otettu kuva ja oikealla 500x suurennos samasta näytearkista. Ylärivissä mekaanisesti hajotettu kuitunäyte, keskellä korkeasakeuspulperoitu sekajättekuitu ja alhaalla mekaanisesti hajotettu referenssikuituseos.

Kuvassa 34 on 1000-kertainen suurennos jauhamattomista kuitunäytteistä. Sekajätekuitunäytteissä on nähtävissä pientä rihmamaista jaetta, mikä voi olla kuidusta irronnutta osaa tai mahdollisesti sienten tai homeiden rihmastoja.



Kuva 34. 1000x suurennos laboratorioarkeista. Vas.ylh. Referenssiseos kierrätyskuidusta, oik. ylh. kopiopaperiarkki, vas.alh mekaanisesti hajotettu sekajätekuitu ja oik. alh. korkeasakeuspulperoitu sekajätekuitu. Näytteet ovat jauhamattomia.

9.5 Mikrobiologinen analyysi

Bakteerien sekä hiivojen ja homeiden kvantitatiivinen määrittäminen tehtiin ainoastaan prosessin alkuvaiheessa. Sekajätteestä erotetun kuidun mikrobien määrä analysoitiin selektiivisillä kasvatusalustoilla, missä muiden kuin tutkitun mikrobin kasvu on estetty. Riittävän kasvatusajan kuluttua maljoilta voitiin manuaalisesti laskea syntyneet pesäkkeet.

Kosteasta sekajätekuitunäytteestä tehdyn mikrobiologisen analyysin tuloksena saatiin kokonaisbakteeripitoisuudeksi $2,8 \cdot 10^9$ pmy/g, joka vastaa kotitalousjätteen sisältämää kokonaisbakteerimäärää. Homeiden ja hiivojen osalta määrä oli $7,6 \cdot 10^8$ pmy/g.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sekajätteestä erotettu kuituaines on laadultaan ja koostumukseltaan vaihtelevaa ja sisältää runsaasti biojätteestä peräisin olevia mikrobeja. Kuituaines koostuu eri suhteissa mekaanisesta sekä kemiallisesta, valkaistusta sekä valkaisemattomasta kuidusta. Työssä saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä sekajätteestä erotetun kuidun laadun olevan monilta osin heikompi verrattuna puhtaan kierrätyskuidun laatuun.

Sekajätteestä erotettu kuitu on hyvin tummaa kuidun harmaantumisen johtuen, eikä vaaleus mustetta poistamalla tai peroksidivalkaisussa nouse riittävästi ollakseen kelvollinen mihinkään korkeaa vaaleutta vaativaan sovelluskohteeseen.

Tutkittujen kuitujen pituus on hajotustavasta riippumatta enimmillään ISO-standardin mukaisesti ilmoitettuna pituuspainotettuna keskiarvona noin 1,0 mm. Kuitujakauma on varsin laaja ja hienoaineksen määrä on suuri. Pitkää kuitua on alle kolmannes, joten tällaisesta kuitunäytteestä valmistettu tuote ei ole kovin lujaa eikä jäykkää. Puhkaisu-, veto- ja repäisylujuusominaisuuksiltaan sekajätteestä erotettu kuitu jää selvästi heikommaksi kuin kierrätyskuituraaka-aine, missä mikrobikontaminaatiota ei ole ollut. Jauhamattoman, sekajätteestä erotetun kuidun vetolujuus on puolet huonompi kuin referenssikuidulla. Korkeampi jauhatustaso parantaa vetolujuutta tasaisesti, mutta sekajätteen kuidun vetolujuus jää jauhettunakin alle referenssikuidun lähtötason. Repäisylujuus on myös noin 60 % heikompi jauhamattomalla sekajättekuidulla, minkä lisäksi repäisylujuus putoaa nopeasti jauhatuksessa, mikä kertoo kuidun rakenteen heikkoudesta. Tämä nähdään myös kuitupituusanalyyseissä, missä havaitaan kuitupituuden lyheneminen rajusti jauhatustason kasvaessa.

Märkähajotuksella matalassa sakeudessa hajotetussa näytteessä ISO-standardin mukainen kuitupituus oli 0,96 mm, korkeasakeuspulperoinnilla hajotetussa näytteessä kuitupituus oli 0,98 mm ja referenssikuitunäytteessä 1,03 mm. Pituuspainotettu keskiarvo kuitujakeesta, missä on mukana myös alle 200 µm:n kokoinen hienoaines oli vastaavassa järjestyksessä 0,64 mm, 0,67 mm ja 0,85 mm. Sekajätteestä erotettu kuituaines sisälsi enemmän hienoainesta ja helposti hajoavaa kuituainesta kuin referenssikuitunäyte. Koska keskimääräinen kuitupituustulos sekä referenssinäytteellä että sekajätteen kuiduilla oli lähes sama, mutta lujustulokset poikkesivat merkittävästi

toisistaan, voitiin päätellä yksittäisen kuidun olevan muokkautunut rakenteeltaan heikommaksi. Hyvä kuitupituus vaikuttaa lujuuteen positiivisesti, mutta saavutettuaan tietyn optimin, kuidun pituus ei enää kasvata lujuutta. Tärkeämpi ominaisuus on tällöin yksittäisen kuidun lujuus, mikä sekajätteen kuitujakeessa osoittautui huonoksi.

Selvemmin kuidun heikkous tuli esiin vasta jauhatustason kasvaessa. Sekajätteestä erotetun kuidun pituus lyheni noin 40 %, kun jauhatustaso oli 1500 krs. Vastaava jauhatus ei lyhentänyt referenssikuitua kuin 5 %. Tavalliselle, rakenteeltaan hyvälle kuidulle 1500 kierroksen jauhatus ainoastaan lisää fibrilloitumista ja parantaa tuotteen lujuusominaisuuksia vaikuttamatta kuidun pituuteen.

Tutkitun kuidun laatu oli vaihtelevaa ja kaiken kaikkiaan heikkoa, eikä se kestänyt prosessivaiheita katkeilematta. Tämä voi osin johtua tutkitun kuidun pitkästä säilytysajasta ja altistumisesta lämmölle lajittelun jälkeen, minkä seurauksena runsas mikrobitoiminta on ehtinyt vaurioittaa kuidun polysakkaridirakennetta erityisen paljon. Merkittävänä rajoitteena sekajätteestä erotetun kuidun käytölle on kontakti biojätteeseen, sillä sitä ei voida täysin estää, eikä sen vaikutuksia ennakoita. Lyhyet säilytys- ja varastointiajat minimoivat mikrobien aiheuttamat vauriot, mutta kokonaan niitä ei voida ehkäistä.

Sekajätteestä erotetun kuituaineksen paperiteknistä potentiaalia varten tutkituista prosessiparametreista tahmojen sekä likapilkkujen poistuminen painelajittelun sekä flotaation vaikutuksesta voidaan osoittaa toimivaksi. Sekajättekuidun prosessoiminen onnistuu siis olemassa olevilla uusiomassan valmistuksen osaprosesseilla. Tahmojen määrä tutkitussa näytteessä laskee alle kierrätettävyyden raja-arvon $5000 \text{ mm}^2/\text{kg}$ tuotetta ja likapilkkujen määrä väheni viidennekseen alkuperäisestä. Likapilkuille on siistattavuuden arvioinnissa käytetty raja-arvoa, mihin ei tässä työssä päästy. Likapilkkujen pinta-alan väheneminen oli kuitenkin huomattavaa lähtötilanteeseen verrattaessa ja osaprosesseja tehostamalla voidaan varmasti saada likaa poistettua enemmänkin. Optimointeja ei tämän työn puitteissa ollut mahdollista tehdä.

11 YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli selvittää sekajätteestä erilleen lajitellun kuitumaisen aineksen ominaisuuksia ja sen hyödyntämismahdollisuuksia sekä rajoitteita. Jätteet ja niiden synty nähdään yleisesti kasvavana ongelmana, mutta niissä voi piillä myös mahdollisuuksia, jos jäte opitaan näkemään resurssina. Jättemäärien jatkuvasti lisääntyessä on lainsäädäntö puolestaan tiukentunut ja jätteiden hyödyntämiselle materiaalina ja energiana on asetettu entistä optimistisemmat tavoitteet. Kaatopaikattavalle jätteelle kehitetään erilaisia esikäsittelytekniikoita, joiden avulla saadaan eri jakeet hyödynnettyä tehokkaasti ja loppusijoitukseen päätyisi ainoastaan jättejake, jonka hyödyntäminen ei ole teknisesti mahdollista tai taloudellisesti kannattavaa.

Sekajätteestä erotetun kuidun käyttöä rajoittavat ensisijaisesti uusiomassan käytön tiukat puhtausvaatimukset. Valmistusprosessille vahingollisia aineita ovat kulutuksen jälkeän sekajätekeräyksessä mukaan tulleet hiekka, lasi ja metallit, jotka on poistettava prosessin toimivuuden vuoksi. Myös muut haitalliset yhdisteet, kuten paperinvalmistuksen täyteaineet sekä jatkojalostuksen lisäaineet (painomuste, liima), on poistettava tehokkaasti, sillä ne hankaloittavat kuitumassan prosessoituvuutta esimerkiksi pakkausmateriaaliteollisuudessa. Oman ongelmansa muodostavat ruoanjätteet ja niistä aiheutuvat lukuisat mikro-organismit, mitkä rajoittavat lopputuotteen käyttökohteita aiheuttamalla terveysriskin. Mikrobiologinen toiminta myös hajottaa kuidun rakenteita vaikuttaen kuidun lujuusominaisuuksiin.

Tässä työssä päädyttiin käsittelemään sekajätteestä erotettua kuitua puhdistamalla sitä painelajittelun avulla, sillä painelajittelu on paljon käytetty fraktiointimenetelmä ja on hyvin tehokas epäpuhtauksien poistossa. Toisena osaprosessina oli flotaatio eli vaahdotus, jonka avulla poistetaan pienempikokoista likaa, kuten irronnutta mustetta, tahmoja ja likapilkkuja kuitumassasta. Sekajätteestä erotetun kuidun laatuominaisuuksia sekä osaprosessien vaikutuksia voidaan tutkia erilaisin analyysein, joiden avulla saadaan kokonaiskuva kuidun ominaisuuksista ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Tähän työhön valittiin mm. likapilkkuanalyysi, makrotahmoanalyysi, optisten ominaisuuksien määrittäminen, tuhka-analyysit sekä fysikaaliset arkkio ominaisuudet ja kuitujakauma.

Sekajätteestä erotetun kuidun hyödyntämisen taloudellisuutta ei tässä työssä tarkasteltu lainkaan. Siihen, syntykö sekajättekuidun materiaalihyödyntämisen ympärille tuottavaa liiketoimintaa, riippuu erityisesti raaka-aineen saatavuudesta sekä toimivista, kustannustehokkaista prosessointimenetelmistä, missä huomioidaan sekajättekuidun erityisominaisuudet. Kierrätyksen rajoitteena on hidas tuotekehitystyö. Tarvitaan uusia sekä tuotteisiin että teknologioihin liittyviä innovaatioita, joiden avulla myös sekajätteestä erotetulle kuidulle voidaan löytää arvokkaita käyttösovelluksia. Kuluttajien ekologinen ja ympäristöystävällinen ajatusmalli on yleistymässä, mikä osaltaan auttaa jättemateriaalien hyödyntämistä sekä kierrätyksen että uusiokäytön kautta.

Seuraavissa kappaleissa käydään tiivistetysti läpi työn aikana saadut keskeiset tulokset, joiden perusteella sekajätteestä erotetun kuidun hyötykäyttötutkimuksia voidaan jatkaa eteenpäin.

11.1 Optiset ominaisuudet

ISO-vaaleus oli tutkittavassa kuitumassassa alhainen ja se myös jäi prosessoinnin jälkeenkkin hyvin matalaksi. Tavoitetasolle pääsy on hyvin haastavaa, jopa mahdotonta. ISO-vaaleus oli prosessoitunakin vain 30 % tasolla, kun kierrätyskuidun siistauksessa tavallisesti tavoitellaan 60 %:a. Suuri valkaisuomien pakkausmateriaalien osuus kuitujakeessa laskee vaaleutta selvästi, mutta ruskean ja valkaistun jakeen erottelu toisistaan on mahdotonta koneellisesti ja haastavaa jopa manuaalisesti kuidun ollessa likaantunut ja hajonnut pienempään kokoon. Työssä testattu vetyperoksidivalkaus nosti massan vaaleutta vain muutaman yksikön korkeammaksi. Tämä ei ole riittävästi voidakseen mahdollistaa sekajätteestä erotetun kuidun käytön vaaleutta vaativissa kohteissa.

Siistattavuuteen vaikuttaa myös käsiteltävän kuidun ikä. Tavallisesti sanomalehden kierrätykseen päättymisen sykli on yleensä hyvin nopea, noin 4-6 viikkoa. Sanomalehden ja painopapereiden ikääntyessä musteenpoisto on haastavampaa. Erityisen hankalia tällöin ovat värilliset painomusteet. Tämä on yksi huomioon otettava seikka sekajätteestä erotetun kuidun prosessoinnissa. Sekajätteen seassa olevan paperikuidun ikäännyttäminen on vaikea arvioida ja se voi vaihdella hyvinkin paljon. Tästä saattoi johtua kuidun harmahtava väri prosessoinnin jälkeenkin, sillä musteen poistuminen ei ollut erityi-

sen tehokasta. Toisaalta väristä ei voi erottaa esimerkiksi mikrobiologisen toiminnan tai valon aiheuttamaa kuidun vanhenemista ja musteen heikkoa poistumista toisistaan.

11.2 Paperitekninen potentiaali

Sekajätekuitumassan tummuus estää sen käytön korkeaa vaaleutta vaativissa paperiteollisuuden sovelluksissa, kuten aikaisemmassa kappaleessa todettiin. Väri ei ole kuitenkaan este pakkausmateriaalikäytössä, jota silmällä pitäen keskityttiin tutkimaan sekajätteestä erotetun kuidun lujuusominaisuuksia ja kuidun laatua. Tutkimuksen tuloksena kuitenkin selvisi, että sekajätteestä erotetun paperikuidun lujuusominaisuudet ovat heikot verrattuna vastaavaan kierrätyskuituun.

Tutkimuksessa vertailtiin vetolujuutta, puhkaisulujuutta sekä repäisylujuutta. Vertailuna käytetty kierrätyskuitureferenssi, missä oli mukana myös pakkausmateriaaleja samassa suhteessa kuin sekajätteen kuitujakeessa, oli selvästi lujempaa kaikissa mitatuissa ominaisuuksissa. Vetolujuus oli puolet heikompaa sekajätteestä erotetusta kuidusta tehdyssä koearkissa verrattuna referenssikuituseokseen. Sekajätekuitun vetolujuus oli 20 kNm/kg ja sitä verrattiin referenssikuituseoksen 39,4 kNm/kg lujuuteen. 1500 kierroksen jauhatuksen jälkeen sekajätekuitun vetolujuus ei yltänyt edes referenssikuidun lähtötasolle. Repäisylujuus jauhamattomassa sekajätekuidussa oli vähän yli 200 mN, kun se referenssissä oli 500 mN. Jauhatusta huononsi kaikkien näytteiden repäisylujuutta, mutta kaikkein nopeimmin sekajätekuidulla. Puhkaisulujuudet olivat myös hyvin heikot. Puhkaisulujuus oli korkeasakeuspulperoidulla näytteellä 64 % ja märkähajotetulla näytteellä 78 % heikompi referenssikuituun verrattuna. Puhkaisulujuuteen ei myöskään jauhatusta vaikuttanut parantavasti kuin hieman. Referenssikuidulla puhkaisulujuus parani 1500 kierroksen jauhatuksessa 25 %.

Tämän työn tulosten perusteella voidaan arvioida mikrobiologisen hajoamisen heikentävän kuidun lujuutta selvästi, sillä puhdas referenssikuitu oli lujuusominaisuuksiltaan selvästi parempi. On syytä epäillä, että kuidun laatu heikkenee pitkässä säilytyksessä, missä mikrobitoiminta on koko ajan hitaasti käynnissä. Työhön sisällytetty sekajätteestä erotetun kuidun prosessointi lajittelemalla sekä puhdistamalla sitä liasta ja tahmoista onnistui. Tahmojen ja likapartikkeleiden määrää saatiin vähennettyä ja kuituuntumatonta materiaalia lajiteltua pois kuitumassasta. Prosessoinnin onnistumisesta kertoo se, että työn alussa tehdyissä veto- ja puhkaisulujuusmittauksissa

saavutettiin noin 25 % korkeammat tulokset kuin myöhemmin prosessoimattomalle kuitumassalle tehdyt mittaukset. Prosessoinnista huolimatta lujuustulokset olivat huonommat kuin referenssimassalla saavutetut.

Paperi ja kartonkituotteiden puhkaisulujuutta esimerkiksi voidaan lisätä ensikuidun osuutta nostamalla ja olisi mielenkiintoista nähdä, mille tasolle sekajätekuidun puhkaisulujuuden saisi nostettua lisäämällä puhdasta ensikuitua lujuuksi antamaan. Todennäköistä on, että sopiva käyttökohde löytyisi myös sekajätteestä erotetusta kuidusta valmistetulle pakkausmateriaalille, jos vain lujuusominaisuudet saadaan lähemmäksi minimivaatimuksia.

11.3 Kuidun prosessoitavuus perinteisin menetelmin

Sekajätteestä erotettu kuitu soveltuu tämän tutkimuksen perusteella prosessoitavaksi vastaavasti kuin keräyskuitumassa. Massan sisältämät likapilkut poistuivat osaprosesseissa hyvin, vaikka lopullinen lukumäärä ja pinta-ala jäivät esimerkiksi Ingeden siistattavuutta arvioivan taulukon raja-arvojen ulkopuolelle. Siistattavuuden raja-arvomaksimi likapilkuille on $600 \text{ mm}^2/\text{m}^2$. Kuitumassaa arvioitiin Ingede -menetelmä avulla pulperoimalla ja flotatoimalla sekä analysoimalla lika ja muste. Tuloksena siistatulle massalle likapilkkujen osalta oli $5100 \text{ mm}^2/\text{m}^2$, vaikka likaa poistui lähes 40 %. Kuitumassaa prosessoitiin myös painelajittelussa ja sen jälkeen flotatoimalla. Tällöin likapilkkujen pinta-alaa saatiin vähennettyä 77 %. Lähtötilanteessa yli $14\,000 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ likaa sisältänyt näyte ei enää viimeisen vaiheen jälkeen sisältänyt kuin $3300 \text{ mm}^2/\text{m}^2$. Tavoitearvoon pääsyyn tarvitaan silti vielä optimoituja käsittelyitä.

Makrotahmojen hallinta on tärkeää kartonkiteollisuudessa koneiden ajettavuuden kannalta. Niiden määrä saatiin osaprosesseilla vähennettyä alle kierrätyskelpoisuuden rajan. Makrotahmojen pinta-ala pulperoidussa näytteessä oli $27\,000 \text{ mm}^2/\text{kg}$, mutta lajittelun ja flotatoinnin jälkeen se oli pudonnut noin $2000 \text{ mm}^2/\text{kg}$. Ingeden mukainen raja-arvo kierrätettävyydelle on $5000 \text{ mm}^2/\text{kg}$, jonka alle prosessoinnilla päästään.

Musteen poistuminen jäi hyvin vähäiseksi (noin 15 %). Muste, erityisesti värillinen painomuste tarttuu kuituun hyvin tiukasti, jos paperi on ikääntynyttä. Jäännösmusteen määrä kuidussa ei kuitenkaan selittänyt kuitumassan tummuutta, eikä vaaleutta näin ollen saada nousemaan, vaikka mustetta saataisiin poistumaan enemmän.

Erilaisia puhdistus- ja lajitteluvaiheita täytyisi lisätä ja optimoida, jotta saataisiin mahdollisimman tehokkaasti poistettua massasta erikokoisia ja erilaisilla ominaisuuksilla olevia epäpuhtauksia. Esimerkiksi dispergoinnin ja pyörrepuhdistimen vaikutus osaprosessina jäi tässä työssä kokonaan huomiotta.

11.4 Mikrobien aiheuttamat ongelmat

Sekajätteen kosteus on hyvin korkea, ja sen vuoksi myös lämpöarvo on suhteellisen matala. Sen lisäksi kosteus vaihtelee paljon riippuen jätteen alkuperästä ja koostumuksesta. Biojätteen syntyperäisen lajittelun taso vaihtelee huomattavan tehokkaasta lajittelusta talouksiin, missä biojätettä ei erilliskerätä lainkaan. Kosteusprosenttia saataisiin pienennettyä, kun biojäte eroteltaisiin hyvin jo syntypaikalla kiinteästä jätteestä. Samalla polttoon menevän jätteen lämpöarvo kasvaisi.

Sekajätteestä peräisin oleva kuitu sisältää suuren määrän erilaisia bakteereita sekä homeita. Suuren mikrobimäärän vuoksi sekajättekuidun hygienisoiminen desinfioidulla tai muulla käsittelyllä, joka inaktivoi mikro-organismien kasvun on välttämätöntä ennen sen käyttöä sovelluksissa, joissa altistuminen on mahdollista. Ellei kuitumassan desinfiointi onnistu osana muita prosesseja esimerkiksi kemiallisella käsittelyllä pulpperoinnin yhteydessä, se tulee nostamaan jätekuidun käsittelyn hintaa merkittävästi. Tämä on huomioitava sovelluskohteita tutkittaessa.

11.5 Pohdinta jätekuidun käytöstä

Kierrätyskuitumarkkinat ovat tasaisessa kasvussa, mutta tasapainottelu jätekuidun energiakäytön sekä materiaalikäytön välillä jatkunee vielä vuosia. Kierrätyskuitu on tällä hetkellä paperiteollisuuden merkittävä raaka-aine, mikä tarkoittaa että saatavuus on varmistettava ottamalla kaikki resurssit käyttöön. Kaatopaikoille ei saisi joutua lainkaan hyödyntämiskelpoista kuituainesta, jos tavoitellaan markkinoiden kasvua sekä kierrätyskuidun hinnan pysymistä maltillisena.

Sekajätteestä erotetun kuidun käyttökohteita kuitenkin rajaavat monet asiat. Hygienenisyys etenkin elintarvikekäytössä on ehdoton vaatimus terveydellisistä syistä. Painoväreistä jäävät mineraaliöljyjäämät tulevat olemaan sekajätteestä erotetun kuidun

käytön yksi rajoittava tekijä, vaikka mikrobeista puhdistettuna kuitu muuten hyväksyttäisiinkin elintarvikekäyttöön. Toiseksi yksittäisen kuidun lujuusominaisuudet ja sekajätteestä erotetun kuituraaka-aineen laadulliset vaihtelut tulevat olemaan erityisen ongelmallinen tekijä jatkoprosesseissa. Kuitua voi todennäköisesti käyttää joissain lujuutta vaativissa kohteissa yhdistettynä neitseelliseen kuituun sopivassa seossuhteessa, mutta samanarvoiseksi raaka-aineeksi keräyskuidun kanssa sitä ei voida laskea.

Jätekuidun fraktioinnilla talteen saatava pitkä kuitu voi mahdollisesti soveltua myös käytettäväksi osana keveitä, kierrätettäviä rakennemateriaaleja, missä lujuusominaisuudet eivät ole niin rajoittava tekijä. Fraktioinnissa rejektiin joutuva lyhyt kuituaines voisi vastaavasti ohjautua esimerkiksi biopolttoainetalostukseen. Sekajätteestä erotetut lyhyet kuitujakeet ja muu orgaaninen aines toimivat mahdollisena raaka-aineena biojalostamoille, joiden kannattavuus on usein kiinni raaka-aineen huonosta saatavuudesta tai kalliista kuljetuskustannuksista. Tähän sovellukseen käytettäessä mikrobien olemassa olo ei ole este, joten sekajätteestä erotetun kuidun käyttö biopolttoaineiden tuotannossa on varteenotettava vaihtoehto.

Koska sekajätteestä erotetun kuidun rakenne on jo heikentynyt, ja jo pienikin jauhaminen saa sen rakenteen hajoamaan, täytyy mahdollisia sovelluskohteita etsiä ennemmin muualta kuin korkeaa lujuutta vaativista kohteista. Tällainen sovellus on esimerkiksi jätemateriaalien käyttö biokomposiiteissa, mikä on tällä hetkellä voimakkaan tutkimuksen kohteena. Sekajätteestä erotetun kuidun soveltuvuus puu-muovikomposiitteihin on myös selvitettävä. Jätekuitu jauhautuu helposti hyvin pienikokoiseksi, mutta sitä onko fibrilloituminen enää mahdollista heikon rakenteen vuoksi, ei ole tutkittu. Komposiiteissa kuitumateriaalia voidaan käyttää mikronisoituna ilman useita puhdistus- ja lajitteluosaprosesseja.

Uusiomassan vaihtelevat ominaisuudet, kuten vaaleus, musteen poistuminen, lujuus sekä tahmojen määrä on riippuvainen massaan käytettyjen keräyspaperilaatujen alkuperäisestä käyttötarkoituksesta. Keräyspaperin lajittelu eri laatuihin on helpompaa jo syntypaikoilla. Sekajätteeseen päätyvä kuituaines sisältää eri pahvi ja paperilaatuja ja on koostumukseltaan hyvin vaihtelevaa ja siksi on haastava löytää sille sovelluskohde. Valkaisemattoman pakkausmateriaalin määrän tiedetään laskevan vaaleutta jo pieninä osuksina valkaistun massan seassa, mikä rajaa pois korkean vaaleuden vaativat sovellukset. Lujuusominaisuudet ovat vastaavasti pitkäkuituisella pakkausmateriaalilla

paremmat kuin lyhytkuituisella mekaanisella massalla, joten runsaasti pakkausmateriaalia sisältävä jae on lujempaa. Paperinvalmistuksen täyteaineet lisäävät tuhkan osuutta ja heikentävät myös vetolujuutta. Sovelluskohteen tulisi olla sellainen, missä kuituraaka-aineen vaihtelevuus ei olisi merkittävä tekijä.

Sekajätteestä erotetun kuidun käyttöä erilaisissa hyötykäyttösovelluksissa ei ole tutkittu tarpeeksi. Näin ollen sekajätteen prosessoinnin tarkempi kannattavuuden arviointi tässä yhteydessä on ennen aikaista.

12 LÄHTEET

Artikkelit, kirjat ja konferenssijulkaisut

Abubakr, S., Scott, G., Klungness, J. 1994. *Fiber fractionation as a method of improving handsheet properties after repeated recycling*. Proceedings of the 1994 TAPPI Recycling symposium; 1994 May 15-18; Boston, MA. Atlanta, GA: TAPPI Press; 1994:309-312.

Ackermann, C., Götttsching, L., Pakarinen, H. 2009. *Papermaking potential of recycled fibre*. Kirjassa (Schabel, S. & Höke, U. (toim.) *Recycled fibre and deinking*. s.436-515. Toinen painos. Papermaking science and technology. Bookwell OY, Porvoo 2010.

Biedermann, M., Ingenhoff, J-E., Barbanera, M., Garbini, D., Grob, K. 2011. *Migration of Mineral Oil into Noodles from Recycled Fibres in the Paperboard Box and the Corrugated Board Transport Box as well as from Printing Inks: A Case Study*. Packaging Technology and Science. Volume 24, Issue 5: 281–290.

Dale, M.C. and Musgrove, D. 2004. *Continuous Conversion of MSW-derived Waste Paper to Bio-Ethanol Using a 100L 6-stage Continuous Stirred Reactor Separator*. Saatavana: <http://bio-process.com/wp-content/uploads/2009/pdfs/MSW.pdf>

Gustafsson, H., Surakka, J., Huuskonen, J., Lankinen, M., Matula, J. 1983. *Massan puhdistus ja ilmanpoisto*. Kirjassa: Arjas, A. (toim.) *Paperin valmistus*. s.497-524. Toinen painos. Teknillisten tieteiden akatemia. Oppikirjasarja III, osa 1. Oy Turun Sanomat, Turku 1983.

Götttsching, L. and Pakarinen, H. 2000. *Recycled fiber and deinking*. Fapet Oy, Jyväskylä, Suomi.

Hägglom-Ahnger, U., Komulainen, P. 2003. *Paperin ja kartongin valmistus*, 3. tarkistettu painos. Gummerus kirjapaino Oy. Jyväskylä

Iosip, A., Nicu, R., Ciolacu, F., Bobu, E. 2010. *Influence of recovered paper quality on recycled pulp properties*. Cellulose Chem. Technology, 44(10), 513–519 (2010)

Körkkö, M., Haapala, A., Mäkinen, L., Ämmälä, A., Niinimäki, J. 2011. Comparison of test medium preparation methods for residual ink analysis. Tappi Journal Vol 10 no. 10. October 2011.

Milmo, S., 2012 *Packaging Converters are Looking To Phase Out Mineral Oils in Inks* Lehtiartikkeli verkkojulkaisuna. Ink World Magazine 1/2012. [Viitattu 11.10.13]
Saatavana: <http://www.inkworldmagazine.com/articles/2012/01/european-report>

Mäkinen, L., Ämmälä, A., Pirkonen, P. and Niinimäki, J. 2012. Sludges analysis procedure for evaluating the utilization potential. The magazine for the international pulp and paper industry. IPW 1/2012:36-42.

Niinimäki, J., Ämmälä, A., Jokinen, H. 2007. *Fractionation of fibres – possibilities and limits*. Konferenssijulkaisu. PulpPap. conf. innov. sustain. forest. Res.[viitattu 14.10.2013]

Rahman M.O., Hussain, A., Scavino, E., Hannan, M.A., Basri, H. 2009a. *Recyclable Waste Paper Sorting Using Template Matching*. H. Badioze Zaman *et al.* (Toim): IVIC 2009, LNCS 5857, s. 467–478, 2009. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Salkinoja-Salonen, M. 2002. Mikrobiologian perusteita. 760 s. Helsingin yliopisto: Soveltavan kemian ja mikrobiologian laitos. Gummerus kirjapaino. Jyväskylä.

Sankar Roy, A., Bhattacharjee, M., Mondal, R., Ghosh, S. 2007. *Development of Mineral Oil Free Offset Printing Ink Using Vegetable Oil Esters* J.Oleo Sci. 56, (12) 623-628 (2007).

Scott, G. and Abubakr, S. 1994. *Fractionation of secondary fiber – A review*. Progress in paper recycling. 05/1994, vol. 3, no. 3. p.50-59. Saatavana: <http://www.esf.edu/pbe/scott/research/papers/013.pdf>

Vahlroos, S., Kärkkö, M., Rosencrance, S., Niinimäki, J. 2008. *Post-bleaching response of pulps deinked using an alkaline fatty acid soap or reduced alkaline surfactant blend chemistry*. Progress in paper recycling, Vol. 17, No. 3, 2008

Tilastot, oppaat ja tuote-esitteet

Ajanko, S., Moilanen, A. & Juvonen, J. 2005. *Jätteiden syntypaikkalajittelujärjestelmän ja käsittelytekniikan vaikutus kierrätyspolttoaineen laatuun*. VTT tiedotteita 2317 [Viitattu 15.10.2013] Saatavana: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2317.pdf>

Alakangas, E. 2000. *Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia*.

Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2045. [viitattu 10.11.2013] Saatavana: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

Fermacell 2013. Fermacell finland tuote-esitteet. [Viitattu 25.10.2013]

Saatavana: <http://fermacell.fi/esitteet.html>

Fermacell-kuitukipsilevyt – laadukas kokonaistaloutta parantava ratkaisu. Tuote-esitys.

Xella International. Verkkójulkaisu. [Viitattu 9.10.13] Saatavana:

http://fermacell.fi/material/fermacell_yleisesite.pdf

Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä (HSY). 2013. Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu vuonna 2012. Koostumustutkimus.

Saatavana:

http://www.jly.fi/2_2013_pks_kotitalouksien_sekajatteen_maaja_ja_laatu_lr.pdf

Häkkinen, E. Merilehto, K., Salmenperä, H. 2014. *Valtakunnallisen jätesuunnitelman seurannan väliraportti 2*. Ympäristöministeriön julkaisu. [Viitattu 21.4.2014]

Saatavana:

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/43010/YMra_6_2014.pdf?sequence=1

Jäteopas. Hangassuon jäteasema, Pori [viitattu 7.10.2013].

http://www.pori.fi/material/attachments/ymparistovirasto/jateneuvonta/5wPYsiB57/jateopas_pori.pdf

Mroueh, U-M., Ajanko-Laurikko, S., Arnold, M., Laiho, A., Wihersaari, M., Savolainen, I., Dahlbo, H. & Korhonen, M-R. 2007. *Uusien jätteenkäsittelykonseptien mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä*. VTT Tiedotteita 2402. [Viitattu 9.10.2013] Saatavana: www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2402.pdf

Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto [verkkajulkaisu]. ISSN=1798-3339. 2012. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 15.1.2014]. Saatavana: http://www.tilastokeskus.fi/til/jate/2012/jate_2012_2013-11-26_tie_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto [verkkajulkaisu]. ISSN=1798-3339. 2011. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 11.10.2013]. Saantitapa: http://www.tilastokeskus.fi/til/jate/2011/jate_2011_2013-05-17_tie_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkajulkaisu]. ISSN=1797-6049. 2012. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 7.10.2013]. Saatavana: http://www.tilastokeskus.fi/til/khki/2012/khki_2012_2013-05-16_tie_001_fi.html

Rättö, M., Vikman, M., & Siika-aho, M. 2009. *Yhdyskuntajätteiden hyödyntäminen biojalostamoissa*. VTT Tiedotteita 2494. [Viitattu 7.10.2013] Saatavana: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2494.pdf>

Ympäristöministeriö. 2008. *Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016: Kohti kierrätysyhteiskuntaa*. Suomen Ympäristö 3 2 | 2 0 0 8 [Viitattu 11.10.13]. Saatavana: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38363/SY_32_2008.pdf?sequence=3

www-dokumentit, tietokannat

Jätelaitosyhdistys. 2014. Jäte energiana ja energiahyödyntäminen Euroopassa. [Viitattu 25.3.2014] Saatavana: <http://www.jly.fi/energia1.php?treeviewid=tree3>

Knowpap 2011. Paperinvalmistuksen raaka-aineet. Paperitekniiikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö. Knowpap 13.0 (12/2011) Prowledge OY.

Lassila & Tikanoja. 2014. Yrityksen kotisivu. [Viitattu 11.4.2014] Saatavana: <http://www.lassila-tikanoja.fi/sivustot/uudenkaupungin-materiaalinkasittelykeskus/>

Metso oyj Technology report: Metso Technology in 2001 [Viitattu 9.10.2013] Saatavana: http://www.metso.com/reports/technology/teknologia_1_2.html

Metso oyj / Ristola, P. 1999. Urban Mill – Jätteiden energiakäytön ja uusiopaperinvalmistuksen yhdistävä konsepti. Tekesin Jätteiden Energiakäyttö-yrityshankkeen (Y15/99) tiivistelmä. Metso oyj. [Viitattu 9.10.2013] Saatavana: http://virtual.vtt.fi/virtual/waste/tiiv_y15uusi.pdf

Metsäteollisuus – Biotalous suunnannäyttäjänä. Artikkelit: Mineraaliöljyt pakkauksissa. 26.4.2013. [Viitattu 21.10.13] Saatavana verkkojulkaisuna: <http://www.metsateollisuus.fi/toimialat/paperi-kartonki-jalosteet/jalostus-ja-pakkaus/Mineraalioljyt-pakkauksissa-197.html>

Nikula, P. *Metson Urban Mill kampaajätteistä paperia ja energiaa*. Kauppalehti 15.04.2002, sivu 13. Verkkojulkaisu. [Viitattu 9.10.2013] Saatavana: <http://www.kauppalehti.fi/5/i/talous/uutiset/avoinarkisto/trindex.jsp?xid=8008&date=2002/04/15>

Paperonline. 2014. Paper=Recycling. Verkkojulkaisu [Viitattu 22.1.2014] Saatavana <http://www.paperonline.org/environment/paper-recycling>

PTS. 2014. *Image analysis for the paper industry*. Verkkojulkaisu. [Viitattu 20.5.2014] Saatavana: http://se-anz.com/assets/printability/DOMAS_engl.pdf sekä <http://www.igt.nl/igt-site-220105/index-nl/brochures/domas/DOMAS-Sheet.pdf>

Saarinen E. 2009. *Paperiteollisuus investoi kierrätyskuituihin*. Uusiouutiset. Vol. 20 (2009) [Viitattu 30.6.2014] Saatavana: http://www.uusiouutiset.fi/wp-content/uploads/2009/11/uu2009_7_s08-09.pdf

Stora Enso 2014. *Re-board® –built-in sustainability*. [Viitattu 12.3.2014] Saatavana: <http://storaenso.reboard.se/>

Termex Eriste Oy. 2013. Yrityksen kotisivu. *Selluvilla –kaikkien aikojen eriste*.
www.termex.fi [Viitattu 14.10.2013]

Tomra Sorting. 2014. Yrityksen kotisivu. Waste into value. Recycling. [Viitattu 29.4.2014] Saatavana: <http://www.tomra.com/en/solutions-and-products/sorting-solutions/recycling>

Turun Seudun Jätehuolto (TSJ). Verkkojulkaisu 11.10.2012. [Viitattu 9.10.2013]
Ekjalostamo - tulevaisuuden hyödyntämiskäytäntö Turun seudun yhdyskuntajätteille?
Saatavana: <http://www.tsj.fi/fi/uutiset/ekjalostamohanke/>

UPM 2013. *Shotton pyrkii eliminoimaan jätteet*. Verkkojulkaisu [Viitattu 12.11.2013]
<http://www.upm.com/FI/VASTUULLISUUS/Jatteet/Esimerkkeja-jatteen-uusiokaytosta/upm-shottonin-kierratyslaitos/Pages/default.aspx>

Opinnäytetyöt

Mauno, A. 2010. *Uusiomassan valmistuksen ja massan laadun optimoinnin työkalujen kehitys*. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Paperitekniikan koulutusohjelma. Saatavana:
http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12700/Mauno_Arto.pdf?sequence=2

Rintala, H. 2013. *Sekajätteen ja laitosrejektin fraktiointi ja laatu tutkimus jatkokäsittelytarpeen arvioimiseksi*. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Saatavana:
http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/54574/Henri_Rintala.pdf?sequence=1

Teirasvuo, N. 2011. *Syntypaikkalajittelun sekajätteen koostumuksen sekä palamisteknisten ominaisuuksien selvitys Etelä-Karjalan alueella*. Diplomityö. Lappeenrannan yliopisto. Saatavana pdf-tiedostona:
http://www.jly.fi/Etela_Karjala_lajittelututkimus.pdf

Väitöskirjat

Bergström, J. 2006. *Flow Field and Fibre Fractionation Studies in Hydrocyclones*.

Väitöskirja. Kungliga Tekniska Högskolan. Tukholma

Jokinen, H. 2007. *Screening and cleaning of pulp –a study to the parameters affecting separation*. Väitöskirja. Oulun Yliopisto. C274

Körkkö M. 2012. *On the analysis of ink content in recycled pulps*. Väitöskirja. Oulun yliopisto. C425.

Laitinen, O. 2011. *Utilisation of tube flow fractionation in fibre and particle analysis*. Väitöskirja. Oulun yliopisto. C382.

Mäkinen, Liisa. 2013. *Improvement of resource efficiency in deinked pulp mill*.

Väitöskirja. Oulun yliopisto. C450

Sarja, T. 2007. *Measurement, nature and removal of stickies in deinked pulp*.

Väitöskirja. Oulun yliopisto. C 275.

Ämmälä, A. 2001. *Fractionation of thermomechanical pulp in pressure screening*.

Väitöskirja. Oulun Yliopisto. C156