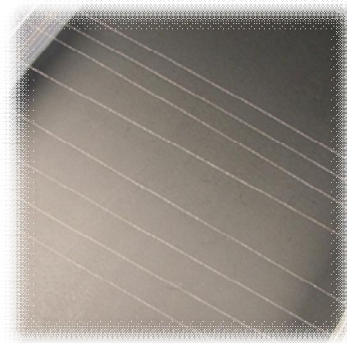
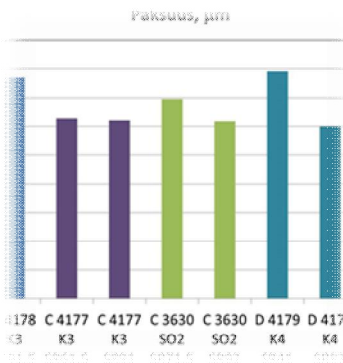


TUTKIMUSRAPORTTI

VTT-R-06095-14



Jätepuusta kuitumateriaalia uusille tuotteille (Puukuitu)

Kirjoittajat:

Hille Rautkoski, Kirsi Kataja, Marie Gestranus, Sari Liukkonen, Marjo Määttänen, Johanna Liukkonen, Jarmo Kouko, Sari Asikainen

Luottamuksellisuus:

Julkinen

Raportin nimi Jätepuusta kuitumateriaalia uusille tuotteille (Puukuitu)		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Ympäristöministeriö PL 35 00023 VALTIONEUVOSTO		Asiakkaan viite Dnro YM59/481/2014
Projektin nimi Jätepuusta kuitumateriaalia uusille tuotteille (Puukuitu)		Projektin numero/lyhytnimi 87174/ Puukuitu
Raportin laatija(t) Hille Rautkoski, Kirsi Kataja, Marie Gestranus, Sari Liukkonen, Marjo Määttänen, Johanna Liukkonen, Jarmo Kouko, Sari Asikainen		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 39/
Avainsanat puupohjainen rakennusjäte, kuidutus, kierrätys, kuitulanka, vaahtoarkki, uudet tuotteet		Raportin numero VTT-R-06095-14
Tiivistelmä <p>Suomessa rakennus- ja purkujätteen kierrätysasteen arvioitiin olevan vuonna 2013 n. 26 % (ilman hyödyntämistä energiana). EU:n tavoitteena on 70 % kierrätysaste vuoteen 2020 mennessä. Projektissa selvitettiin rakennusteollisuuden jätepuuraaka-aineen soveltuvuutta kuidutettavaksi ja sitä kautta kuituraaka-aineeksi uuden tyyppisille kuitupohjaisille sovelluksille (ei paperi- ja kartonkiteollisuuden tuotteet). Rakennusjätteestä puujätteen osuus on Suomessa n. 40 %.</p> <p>Käytöstä poistettu puu on luokiteltu neljään luokkaan lähinnä jätepuun puhtauden ja käyttötarkoituksen mukaan lajiteltuna. Projektiin hankittiin jätepuuta luokista B-D. Puhtain luokka A jätettiin pois tutkimuksista, koska sen käyttö on rinnastettavissa alkuperäiseen puuraaka-aineeseen ja se käyttäytyy kuten tavallisesti keitettävä/hierrettävä puuainees. Projektissa testattiin nykyisin paperiteollisuudessa tyypillisesti käytössä olevia jauhatus- ja keittomenetelmiä. Lisäksi selvitettiin muita mahdollisia tapoja kuiduttaa jätepuuta. Jätepuu on lajiteltava ja siitä on erotettava esimerkiksi metallit, muovit ja muut epäpuhtaudet mahdollisimman hyvin ennen murskausta ja kuidutusta. Olemassa olevia esikäsittelyprosesseja käytiin läpi.</p> <p>Luokkien B-D jätepuuta kuidutettiin onnistuneesti hiertämällä ja/tai keittämällä. Kuitumassasta valmistettiin puukuitulankaa ja vaahtoarkkeja. Teknisesti estettä rakennuspuujätteen uudelleenkäytölle ei ole. Jokaisen mahdollisen uuden sovelluksen vaatimukset pitää ottaa huomioon, kun etsitään optimaaliset käsittelyolosuhteet. Tässä projektissa ei kuitenkaan tutkittu kemiallisessa kuidutuksessa syntyvien jäteliemien koostumusta eikä niiden jatkokäsittelyä ja puhdistusta.</p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 14.1.2015 Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
Hille Rautkoski Erikoistutkija	Mika Vähä-Nissi Johtava tutkija	Pia Qvintus Tutkimusalueen johtaja
VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Ympäristöministeriö, VTT, sähköinen raportti, arkisto		
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>		

Alkusanat

Tämä työ on saanut rahoituksen sekä Ympäristöministeriön rahoittamasta kierrätystä ja uusiomateriaalien käyttöä edistävien kehittämis- ja kokeiluhankkeiden hankehausta että VTT:ltä.

Työn valvojana Ympäristöministeriön puolesta on toiminut neuvotteleva virkamies Else Peuranen ja VTT:n vastuullisena johtajana on ollut johtava tutkija Mika Vähä-Nissi.

Espoo 14.1.2015

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
Sisällysluettelo.....	3
Termistö	4
1. Johdanto.....	6
2. Tavoite.....	7
3. Jätepuuraaka-aineet	7
3.1 Yleistä.....	7
3.2 Jätepuuluokat A, B, C ja D.....	10
4. Raaka-aineen käsittely.....	11
4.1 Kuidutusmenetelmät	14
4.1.1 Kemiallinen kuidutus – yleistä	14
4.1.2 Keiton toteuttaminen tässä tutkimuksessa	15
4.1.3 Kemiallinen massan valkaisu tässä tutkimuksessa	16
4.1.2 Mekaaninen kuidutus – yleistä	17
4.1.3 Mekaaninen kuidutus tässä tutkimuksessa	18
4.1.4 Veitsimylly.....	19
4.1.5 Muut mahdolliset käsittelymenetelmät.....	20
4.2 Massojen testausmenetelmät	21
4.2.1 Kuitulangan valmistus – kemiallisen massan testaus	21
4.2.2 Paneelimaiset rakenteet – mekaanisen massan testaus	23
5. Tulokset kokeellisesta tutkimuksesta	24
5.1 Kuidutustulokset	24
5.1.1 Kemiallinen kuidutus – keitto.....	24
5.1.2 Kemiallinen kuidutus – valkaisu.....	28
5.1.3 Mekaaninen kuidutus - hiertäminen.....	30
5.1.4 Mekaaninen kuidutus - veitsimylly	30
5.2 Kuitujen testaus	31
5.2.1 Kuitulanka	31
5.2.2 Paneelimaiset rakenteet.....	32
5.3 Kestopuun käyttö raaka-aineena	33
6. Suuntaa antava teknistaloudellinen arviointi.....	34
7. Johtopäätökset	36
Lähdeviitteet.....	37
Liite Aiheeseen liittyviä EU-projekteja ja linkkejä niihin	39

Termistö

A-D luokat

Puujätteen luokittelu neljään eri luokkaan puun laadun mukaisesti.

Aksepti

Hyväksytty jae lajittelussa.

Alkaliuutto

Alkaliuutto tehdään natriumhydroksidilla. Alkaliuutossa aiemmassa valkaisuvaiheessa, esim. klooridioksidivaiheessa, hajonnut ligniini liukenee emäksisissä oloissa.

CCA-käsittely

Paineekyllästettyä puuta on käsitelty CCA-kyllästeellä, joka sisältää arseenia, kromia ja kuparia.

Hake

Tietynkokoiseksi haketettu puubiomassa, joka on valmistettu mekaanisesti terävillä työkaluilla.

Happidelignifiointi

Happivalkaisu on sellun valmistusprosessin vaihe, jossa massan ligniinipitoisuutta pienennetään happikaasun (O₂) avulla alkalisessa ympäristössä.

Kelatointi

Metallien poistamista kemiallisesti.

Kemiallinen kuidutus

Kemiallisen massanvalmistuksen periaate on liottaa kuituja toisissaan kiinnipitävä ligniini siten, että kuidut irtoavat toisistaan.

Kemimekaaninen

Kemiallisesti esikäsitellystä raaka-aineesta mekaanisesti kuidutettu paperimassa.

Kestopuu

Kestopuu on määrätyt laatuvaatimukset täyttävää painekyllästettyä puuta.

Kierrätyspuu

Biopolttoaineeksi luokiteltava puhdas puutähde tai käytöstä poistetut puu tai puutuote, kuten uudisrakentamisen puutähde, puu- ja kuormalavat.

Kimmomoduli

Kappaleeseen kohdistuvan jännityksen suhde sen aikaansaamaan suhteelliseen venymään. Se kuvaa kappaleen venymistä venyttävän voiman vaikutuksesta.

Mekaaninen kuidutus

Raaka-aine kuidutetaan pääasiassa mekaanisen rasituksen avulla veden läsnä ollessa. Olennainen osa mekanismia on puun lämpeneminen mekaanisen kuormituksen johdosta.

Mustalipeä

Mustalipeä eli jäteliemi on sellunkeitossa käytettävän sulfaattimenetelmän sivutuote.

Murtovenymä

Venymä kappaleen murtuessa, enimmäiskuormituksen aiheuttama venymä.

Painekyllästetty puu

Painekyllästäminen on puutavaran säänkeston parantamista kyllästämällä puu suoja-aineilla yli-/alipaineessa. Suoja-aineet estävät puun lahoamisen ja hyönteisten aiheuttamat vauriot, parantavat puun kestoa auringon ultraviolettisäteilyä kohtaan sekä parantavat muotopysyvyyttä.

Purkupuu

Purkupuu on käytettyä puuta, jota syntyy rakennuksia tai maa- ja vesirakennustyömaiden rakenteita purettaessa.

Puujäte, jätepuu

Jätepuulla tarkoitetaan rakennus-, purku, ja korjaustoiminnassa syntyvää jätepuuta sekä metsäteollisuudessa syntyvää jätepuuta, joka sisältää liima-, maali-, kyllästys- tms. aineita.

Rakennusjäte

Rakennustoiminnan tuotanto-, korjaus- ja purkujäte. Sisältää muutakin kuin puujätteen.

Rejekti

Hylätty jae lajittelussa.

Sellu

Selluksi kutsutaan paperimassaa, joka on valmistettu puuhakkeista kemiallisella massanvalmistusmenetelmällä, esimerkiksi sulfaattimenetelmällä. Sellu koostuu pääosin selluloosasta ja hemiselluloosasta.

Tex arvo

Langan tex-numerolla tarkoitetaan 1000 m pituisen langan painoa grammoina. (= suora järjestelmä; mitä suurempi lankanumero, sitä paksumpi lanka).

Vetolujuus

Kappaleeseen kohdistuvan voiman suhde sen leveyteen kappaleen murtuessa.

1. Johdanto

Vuonna 2013 noin kolmannes Euroopassa syntyvästä jätteestä oli rakennus- ja purkujätettä. EU:n jätedirektiivi edellyttää, että jäsenmaissa vuoteen 2020 mennessä kierrätetään 70 % rakennus- ja purkujätteistä materiaalina. Tähän lukuun on laskettu myös maamassat, jotka muodostavat suurimman osan rakennus- ja purkujätteestä. Suomessa rakennus- ja purkujätteen kierrätysasteen arvioitiin vuonna 2013 olevan 26 % (ilman hyödyntämistä energiana), kun muualla EU:ssa se oli keskimäärin 47 %. Syynä eroon on mm. puujätteen suuri osuus Suomessa. Kansainvälisessä kierrätysvertailussa Suomi jää kauaksi rakennusjätekierrätyksen kärkimaista kuten Hollannista ja Tanskasta, joissa molemmissa on saavutettu yli 90 %:n kierrätysaste. Suomessa syntyvästä talonrakentamisen rakennusjättemäärästä suurimman jätelajeen muodostavat puupohjaiset jätteet, 41 %, sen jälkeen mineraali- ja kivijätteet, 33 %, ja metallijätteet, 14 %./1/

Talonrakentamisessa rakennus- ja purkujätteestä valtaosa eli 57 % syntyy kokonaisten rakennusten purkamisesta ja 16 % uudisrakentamisesta. Rakennusjätteiden hyödyntämismahdollisuudet vaihtelevat jätelajeittain ja alueellisesti maassamme suuresti. Erityisesti huonolaatuisen puujätteen hyödyntäminen on ollut hankalaa, joten se menee pääasiassa polttoon. Talonrakentamisessa syntyneen puujätteen kierrätyksen ongelmina voivat olla purkupuun sisältämät kosteus- ja homevauriot tai muut epäpuhtaudet. Rakennusjätteen sisältämä puu voi olla myös hyvälaatuisia ja samalla materiaalikierrätykseen kelpaavaa./1/ Puujätteen pääasiallinen hyödyntämistapa on ollut poltto, koska uusio- ja uudelleenkäyttöä rajoittavat rakennusmateriaalien laatuvaatimukset.

Alakangas ym./2/ raportissa on laadittu puujätteen neliportainen laatuluokitussuositus sekä energiantuottajien ja jätepuuta tuottavan teollisuuden että jätepuuta prosessoivien yritysten tarpeisiin. Eurooppalaiseen EN 14961 standardiin perustuvassa puujätteen luokituksessa luokat A ja B ovat biopolttoaineita. Luokka A on kemiallisesti käsittelemätöntä puuta ja luokka B kemiallisesti käsiteltyä puuta. Käytöstä poistettu puu, pois lukien purkupuun, kuuluu yleensä luokkiin A ja B. Tällaista puuta ovat esimerkiksi kuormalavat, uudisrakennuksien puutähdet ja huonekalut.

Luokan C puu voi sisältää raskasmetalleja ja orgaanisia halogenoituja yhdisteitä, mutta ei puun kyllästysaineita. Luokka C on kierrätyspolttoainetta. Purkupuun kuuluu tähän luokkaan, ellei toisin todeta. Purkupuun on käytettyä puuta, jota syntyy rakennuksia tai maa- ja vesirakennustyömaiden rakenteita purettaessa. Luokka D on vaarallista jätettä, johon kuuluvaa puuta on käsitelty puun kyllästysaineilla. Sitä ei saa sijoittaa muualle kuin vaaralliselle jätteelle luvan saaneelle kaatopaikalle eikä polttaa muualla kuin tarkoitusta varten suunnitellussa polttolaitoksessa./3/

Kuidutettua materiaalia voidaan käsitellä muillakin tavoilla kuin perinteisillä paperinvalmistusmenetelmillä. Sopivalla tavalla kuidutettua puuta voidaan esimerkiksi vaahdottaa ja rainata tai valaa muottiin, josta vesi imetään pois./4/. Näin saadaan aikaiseksi esimerkiksi kevyitä paneelirakenteita tai tasokappaleita. On olemassa myös teknologia, jolla selluloosakuidut voidaan yhdistää langaksi ilman kehruprosessia./5/ Menetelmällä aikaansaataavaa puukuitulankaa voidaan käyttää erilaisissa kangasmaisissa rakenteissa, ja sen tuotantoprosessi on yksinkertainen sekä taloudellisesti edullinen.

2. Tavoite

Projektin tavoitteena oli selvittää voiko puupohjaista rakennusjätettä - erityisesti puujätteen ns. vaikeasti kierrätettäviä fraktioita - polttamisen sijaan kuiduttaa ja käyttää uusien kuitupohjaisten materiaalien raaka-aineena (muut kuin paperi- ja kartonkiteollisuuden tuotteet). Projektissa testattiin voidaanko jätepuuta kuiduttaa teknistaloudellisesti järkevästi niin, että aikaansaadun kuitumassan ominaisuudet ovat vastaavat kuin puhtaasta puusta saadulla kuitumassalla (kemiallinen tai mekaaninen sellu), joista voidaan valmistaa vaahdottamalla paksuja paneelimaisia tai valettuja kappaleita /4/, tai puristaa sellua suuttimen läpi lankamaiseksi tuotteeksi /5/. Mikäli jätepuusta saatavan kuitumassan ominaisuudet olisivat riittävät, avautuisi puupohjaisten jätteiden jatkokäyttöön ja hyödyntämiseen innovatiivisia uusia mahdollisuuksia. Tuloksia tulotisiin hyödyntämään EU:n H2020 Waste -hakuun tehtävässä projektiehdotuksessa, jonka yksi päämäärä on mahdollistaa rakennus- ja purkujätteen kierrätysasteen nosto kohti jätedirektiivin 70 %:in tavoitetta.

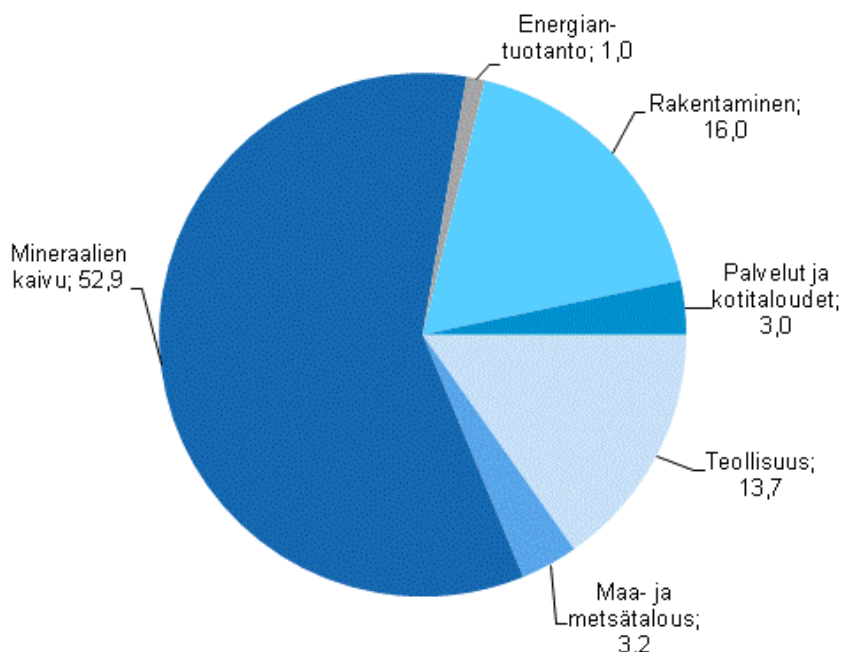
Etukäteen haasteiksi arvioitiin jätteenkäsittelylaitokselta saatavien puumateriaalifraktioiden metalli-, betoni- ja muut epäpuhtaudet sekä sinistymä. Epäpuhtaudet saattaisivat estää riittävän hienoksi kuiduttamisen vahingoittamalla laitteistoja, ja sinistymä eli home voisi haitata kemiallista kuidutusta sekä estää kuitujen sitoutumisen uusiksi materiaaleiksi.

Jalostusketjun selvitys sisälsi eri jätepuuluokkien saatavuuden ja soveltuvuuden, käytössä olevat ja mahdolliset mekaaniset puhdistus- ja erotusmenetelmät, ensivaiheen haketus/jauhatusmenetelmät, jatkomenetelmät joko keiton kautta tai edelleen jauhamalla, sekä saadun kuitumassan sidostenmuodostuskyvyn testauksen joko paneelimaisia rakenteita tai kuitulankaa valmistamalla.

3. Jätepuuraaka-aineet

3.1 Yleistä

Kuvassa 1 on esitetty Suomessa syntyvät jätemäärät sektoreittain. Polttokelpoisia jätteitä kertyi Suomessa vuonna 2012 noin 16,4 miljoonaa tonnia. Näistä 16,0 % syntyy rakentamisen jätteinä. Jätteiden kokonaismäärä vuonna 2012 oli noin 90 miljoonaa tonnia. Taulukossa 1 on esitetty joidenkin jäteryhmien määrät ja käsittelytavat. Puujätettä käsiteltiin vuonna 2012 11,3 miljoonaa tonnia, josta suurin osa poltettiin /6/.

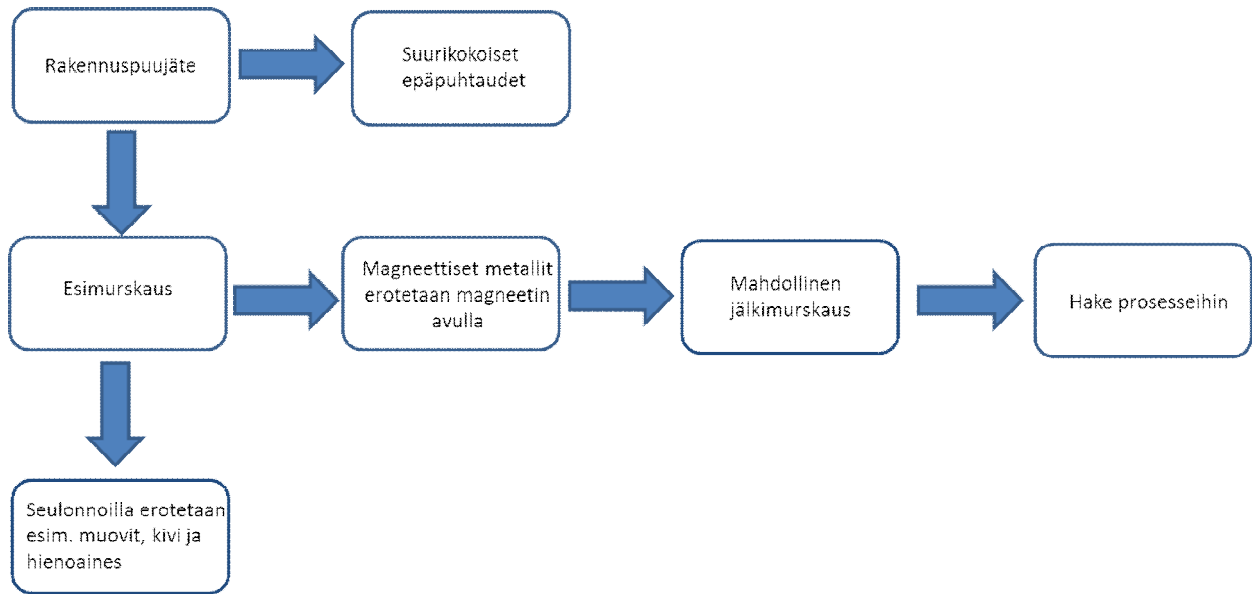
Jättemäärät sektoreittain vuonna 2012, miljoonaa tonnia


Kuva 1 Jättemäärät sektoreittain /6/

Taulukko 1 Joidenkin jäteryhmien määrät ja käsittelytavat 2012, 1000 tonnia vuodessa /6/

	Käsittelytapa				
	Käsittely yhteensä	Aineskäyttö	Energiakäyttö	Muu poltto	Kaatopaikka
Kemialliset jätteet	666	162	28	143	333
- josta vaarallista jätettä	193	86	7	83	17
Metallijätteet	1 176	1 169	0	1	6
Lasijätteet	162	161	0	0	1
Paperi ja pahvijätteet	569	522	34	13	0
Muovi ja kumijätteet	76	22	42	10	2
Puujätteet	11 253	2 780	8 426	45	2
- josta vaarallista jätettä	10	0	9	1	0

Jätepuu pitää murskata ja lajitella ennen sen jatkokäyttöä. Kuva 2 esittää periaatteen, miten murskaus ja lajittelu tapahtuu. Kuva on osittain muokattu lähteiden /7, 8, 15/ pohjalta. Jätepuuta tulee jätelaitoksille sekä syntypaikkalajiteltuna puujätteenä että sekalaisen rakennusjätteen joukossa. Myös kaupan ja teollisuuden energiajakeen joukossa on jonkin verran puuta. Syntypaikkalajittelusta puujätteestä hävikkiä ei käytännössä tule. Jos puuta erotellaan sekalaisesta jätteestä, kaikkea ei saada erilleen, vaan osa päätyy hyödynnettäväksi kierrätyspolttoaineena. Jätelaitoksen vastaanotossa puujätteen laatu tarkastetaan ja se lajitellaan laadun mukaisesti (B- ja C-luokka). Mekaanisessa prosessoinnissa puujätteet murskataan (yksi- tai kaksivaiheinen murskaus) ja metallit erotetaan. /8/



Kuva 2 Rakennuspuujätteen murskauksen ja lajittelun periaate. Kuva on osittain muokattu lähteiden /7, 8, 15/ pohjalta.

Jättemurskaimia

Erilaisia murskaimia käytetään tavanomaisesti jätteenkäsittelyssä. Monilla jätteenkäsittelyn kanssa työskentelevillä laitoksilla ja yrityksillä on murskaimia käytössä. Pienemmät silppurit ovat usein siirrettäviä, ja niillä voidaan myös käsitellä rakennuspuujätettä /9/. Niissä on usein kiekko- tai rumpuhakkuri. Isommat murskaimet ovat kiinteitä, ja niissäkin on usein kiekko- tai rumpuhakkuri. Murskaimilla on mallista riippuen jonkun verran mahdollisuuksia säätää jättepuun hakkeen kokoa /10/. Joissakin murskaimissa on kaksivaiheinen murskaus /11/, jolla saadaan yhdellä läpiajolla hienompaa jaetta. Toiset laitevalmistajat tarjoavat sekundaarimurskaimia /12/ hienontamaan murskettä, mikä on syntynyt ensimmäisen murskauksen jälkeen.

Biomassasta raaka-aineena käydään jo kilpailua, ja koska yhä enemmän saastunutta puuta murskataan, myös murskaimen tuottajat ovat kehittäneet laitteistoja, esimerkiksi versioita vasaramyllyistä, jotka kestävät metallijäämiä paremmin. /13/



Kuva 3 Siirrettävä murskain /10/



Kuva 4 Toisiomurskain /12/

3.2 Jätepuuluokat A, B, C ja D

Jätepuu on luokiteltu neljään eri laatuluokkaan /2/ sekä energiantuottajien että jätepuuta tuottavan teollisuuden kuin myös jätepuuta prosessoivien yritysten tarpeisiin.

Projektiin hankittiin näytteitä jättepuuluokista B-D. Luokkaan A kuuluva puujäte on kemiallisesti käsittelemätöntä ja käyttäytyy kuten tavallisesti keitettävä/hierrettävä puuaines. Tästä syystä tässä projektissa ei testattu tähän luokkaan kuuluvaa puujätettä. Laatuluokkaan B kuuluva puujäte on massiivipuuta, jossa on mekaanista epäpuhtautta, kuten betonia ja nautoja. Lisäksi liimoja sisältävät raaka-aineet kuuluvat myös B-luokkaan (vaneri- ja lastulevyt, liimapuut, MDF). Maalattu purkupuu kuuluu laatuluokkaan C. Puuraaka-aineessa mahdollisesti olevat sinertymät ja homeet laskevat kuidun lujuuksia (paperi- ja kartonkisovelluksissa) ja huonontavat valkaistavuutta ja valkaisukemikaalien kulutus lisääntyy. /26,27/ Tämän työn sovelluksiin tällä ei ole vaikutusta. Jätepuumurskenäytteet luokista B-C saatiin Lassila&Tikanojan Keravan laitokselta, jossa jätteestä on pääosin poistettu metallit, muovipitoiset roskat sekä muita epäpuhtauksia.

D-luokkaan kuuluva jätepuu on kestopuuta eli kyllästysaineilla käsiteltyä puuta. Kestopuu käsitellään nykyään vesipohjaisilla kuparikyllästeillä, jotka koostuvat monista erilaisista kupariyhdisteistä. /14/ Aiemmin kestopuu käsiteltiin usein CCA-kyllästeellä, joka sisältää kuparin lisäksi myös arseenia ja kromia tehden kestopuusta käytön jälkeen vaarallisen jätteen.

Kestopuuta tulee vuosittain Demolite Oy:lle noin 22-23 000 t, josta noin kymmenesosa on kuparikyllästettyä. /15/ Kuparikyllästetyn puujätteen määrä tulee kasvamaan hitaasti ja täten sen hyödyntäminen ei ole suurimittaisesti lähitulevaisuudessa todennäköistä. Tällä hetkellä kaikki kestopuujäte kerätään ja murskataan Demolite Oy:n toimesta. Toistaiseksi kaikki murske poltetaan energiaksi kyllästetyn puun käsittelyyn erikoistuneissa polttolaitoksissa. Polton savukaasut puhdistetaan ja tuhkasta otetaan talteen kyllästysaineiden metalliyhdisteet. Vuonna 2012 Suomessa tuotettiin teollisesti kyllästettyä puuta yhteensä 309 000 kuutiometriä. /16/

Työturvallisuussyistä tässä projektissa ei haluttu prosessoida arseenikäsiteltyä puuta. Arseenipentoksidi on myrkyllistä hengitettynä ja nieltynä. Turvallisuustiedotteen /17/ mukaan CCA-kyllästetyn puun työstössä muodostuvalle pölylle, joka sisältää viisiarvoista arseenia ja kuusiarvoista kromia, altistuminen voi aiheuttaa syöpää. Koska Demoliteltä ei pystytty varmuudella saamaan pelkästään kuparikyllästettyä sisältävää puuta, päädyttiin kuparikyllästetty puu ostamaan kaupasta ja hakettamaan Teollisuuden Hake Oy:ssä Kouvolassa. Lisäksi päädyttiin kuiduttamaan kyllästetty puu vain kemiallisesti, koska mekaanisessa kuidutuksessa (laboratorio-olosuhteissa) olisi vapautunut huoneilmaan raskasmetallipitoista puupölyä. Kuparisuolojen pölyn on todettu ärsyttävän silmiä, ihoa ja limakalvoja. Kupari ei höyrysty prosessissa huoneilmaan, sillä sen kiehumispiste on 2 562 °C /18/. Kuvassa 5 on esitetty B-D luokan murskeet ennen kuidutuksia.



Kuva 5 Lähtötilanne B-D luokan murskeilla ennen kuidutuksia.

4. Raaka-aineen käsittely

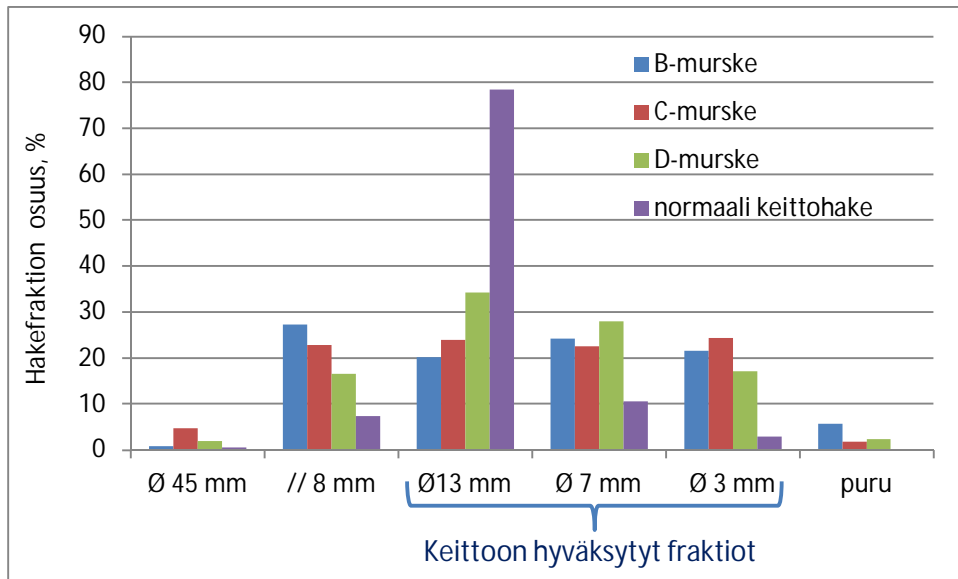
Projektiin hankittu B- ja C-laadun raaka-aine oli puhdistettu ja murskattu Lassila&Tikanon jätteenkäsittelylaitoksessa Keravalla. Murskeista poistettiin mekaanisesti seulomalla VTT:llä ylipaksu- ja ylisuurijae sekä puru käyttäen SCAN-CM 40:01 menetelmää tasaisemman kuidutuksen saamiseksi. Samalla poistui pieniä määriä mekaanisia epäpuhtauksia. Pitkät murskekappaleet saattavat aiheuttaa jauhimen tukkeutumista, joten mekaanista kuidutusta eli jauhatuksia varten poistettiin myös jakeita, joita keitoissa voitiin käyttää. Kuvassa 6 on esitetty B-D luokkien seulonnan jälkeiset akseptit eli hyväksytyt jakeet sekä keittoa että jauhatusta varten. Lisäksi kuvassa näkyvät ylisuuret jakeet. Kuvassa 7 on esitetty SCAN-menetelmällä seulottujen hakefraktioiden osuudet eri raaka-aineluokissa sekä verrattuna normaaliin keittohakkeeseen. Nyt käytetyllä murskevalmistustavalla keittoon hyväksytyyn jakeen määrä oli noin 10 – 25 % -yksikköä alhaisempi (66 – 79 % vs. 92 %) kuin normaalin keittohakkeen. Mekaaniseen kuidutukseen hyväksytyjen jakeiden yhteismäärät olivat B-murske 41 %, C-murske 43 % ja D-murske 25 % alkuperäisestä raaka-aineesta laskettuna.

Käytetty seulontaproseduuri on hyvin samankaltainen kuin teollisissa massanvalmistusprosesseissa käytössä oleva. Tyypillisesti tehtailta ylipaksun ja -suuren jakeen erottelua jatketaan keskipakovoimaan perustuvalla lajittelulla, jossa painavimmat ja

tiheämmät kappaleet (oksat, kivet ym.) erottuvat normaalista puusta ja päätyvät "romuloukkuun". Tällainen käsittely tehostaisi myös jätepuun mekaanisten epäpuhtauksien poistoa. Teollisuusprosessissa ylipaksu- ja ylisuurijae menevät uudelleen murskattavaksi/haketettavaksi tai vaihtoehtoisesti purun kanssa polttoon. Jos oletetaan, että kaikki muut jakeet paitsi puru päätyvät kuidutukseen teollisessa prosessissa, niin tämän työn raaka-aineista maksimissaan vain 5 % olisi kuidutukseen kelpaamatonta. Laboratorio-oloissa sekä ylisuuret ja -paksut jakeet että puru jätettiin prosessien ulkopuolelle. Jakeiden poistolla varmistetaan valmistettavan sellun laadun tasaisuus ja prosessin hyvä ajettavuus.



Kuva 6 Seulonnan jälkeiset jakeet.



Kuva 7. SCAN-menetelmällä seulottujen hakefraktioiden osuudet eri raaka-aineluokissa sekä normaalissa keittohakkeessa.

Normaalisti kemiallisen ja mekaanisen (hierre) massan valmistuksessa hakedimensiot (Kuva 8) poikkeavat tässä työssä käytetystä murskeesta. Murske oli dimensioiltaan pidempää, kapeampaa ja ohuempaa (Taulukko 2), ja itse asiassa kemiallisen massan ominaisuuksia ajatellen jopa sopivampaa dimensioiltaan. Hakkeen pituuden kasvaessa valmistetun massan keskimääräinen kuidunpituus on suurempi, mikä puolestaan parantaa mm. sellun lujuusominaisuuksia. Ohuemalla hakkeella kemikaalien imeytyminen on nopeampaa ja saadaan laadultaan tasaisemmin keittynyttä sellua. Pitkien murskejakeiden liikkuminen nykyisissä prosessilaitteissa voi olla hankalampaa, jolloin riskinä on laitteiden tukkeutuminen ja keittoliuoksen kanavoituminen keittimen sisällä. Mekaanisen massan valmistukseen pisimpien murskejakeiden pituus on liian suuri, joten ne pitää pienentää jauhimien tukkeutumisen estämiseksi.



Kuva 8 Normaali tehdashake on kooltaan ja muodoltaan erityyppistä kuin kokeessa käytetty murske. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty hakedimensiot /19/.

Taulukko 2. Keitto- ja hierrehakkeiden sekä jätepuumurskeen dimensiot /20/

Hakelaatu	pituus, mm	paksuus, mm	leveys, mm
Keittohake	15 - 30	4 - 5 (suositeltava alue)	10 - 23 *
TMP-hierrehake (mekaaninen kuidutus)	13 - 23	3 - 5 (suositeltava alue)	hieman pienempää kuin keittohake
Jätepuumurske**	45 - 100	1-3	2-9

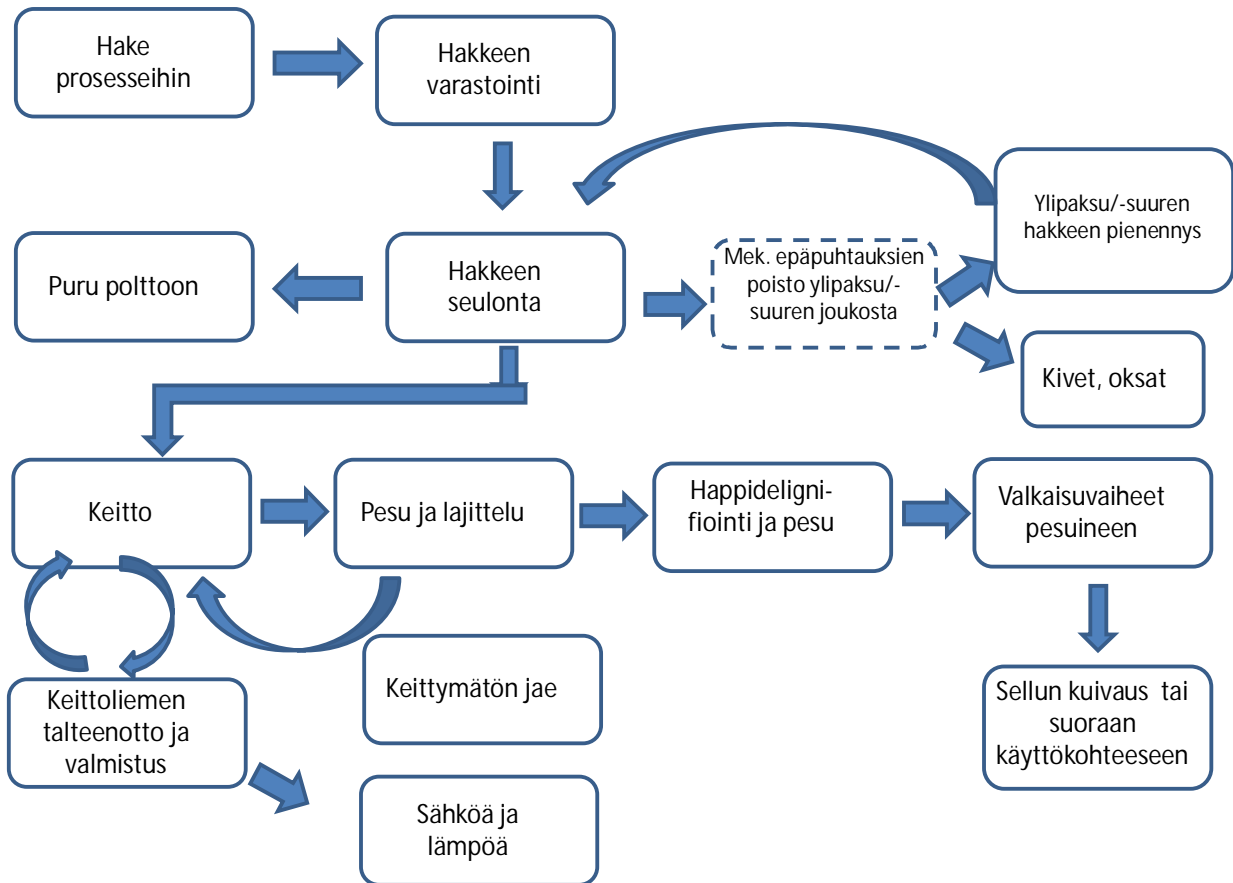
* mitattu arvo aiemmissa töissä, ** mitattu arvo tässä työssä SCAN-seulotusta hyväksytystä jakeesta

Rakennusjätteiden mekaanisten epäpuhtauksien (naulojen, sementin, betonin, hiekan, kivien ym.) poistamisen kannalta olisi järkevä murskata puuaines pienemmäksi kuin mitä nyt tutkimuksessa käytettiin. Tämä vähentäisi massanvalmistusprosessin yhteydessä tehtävää puhdistustarvetta ja ennaltaehkäisisi prosessilaitteiden kulumista ja vioittumista. Todennäköisesti murskeen palakoon pienentäminen on vain murskaimen säätöasia. Sekä kemiallisen että mekaanisen massanvalmistusprosessin kannalta murskeen pienentäminen olisi mahdollista tiettyyn rajaan asti. Toisaalta kyllästettyjen, D-luokan, rakennusjätteiden osalta liian pieneksi murskaamista pitää välttää kyllästeainepitoisten hiukkasten ja pölyn muodostumisen välttämiseksi.

4.1 Kuidutusmenetelmät

4.1.1 Kemiallinen kuidutus – yleistä

Kemiallisen kuidutuksen tarkoituksena on liuottaa puukuituja yhdessä pitävä ligniini keittokemikaalien ja lämmön avulla. Menetelmän luonteesta johtuen 46 – 55 % puuaineesta liukenee keittoliuokseen prosessoinnin aikana. Tästä liuenneesta aineesta noin puolet on ligniiniä ja loput uuteaineita ja hemiselluloosaa. Lehtipuilla sulfaattikeiton saanto on tyypillisesti yli 50 % ja havupuilla 45 – 50 %. Ero johtuu puulajien erilaisesta kemiallisesta koostumuksesta. Keittovaiheen jälkeen keittymätön kuituaines erotetaan lajittelemalla ja palautetaan useimmiten takaisin keittoon. Tämän jälkeen ligniinin poistamista (delignifiointia) jatketaan happidelignifioinnilla ja/tai valkaisu-kemikaalien avulla. Näiden vaiheiden aikana sellun puhtaus ja vaaleus lisääntyvät. Lopullinen kokonaissaanto on tyypillisesti 44 – 50 %. Keiton jäteliemi (mustalipeä) otetaan talteen, ja siinä oleva orgaaninen aines poltetaan soodakattilassa. Sellutehdas tuottaa lämpöä ja sähköä yli oman tarpeensa. Soodakattilan tuhka liuotetaan ja siitä valmistetaan uutta keittoliuosta. Kemiallisen massan valmistusprosessi on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Kemiallisen massan valmistusprosessi

4.1.2 Keiton toteuttaminen tässä tutkimuksessa

Kemiallisen kuidutuksen tavoitteena oli valmistaa jätepuuraaka-aineista kemiallista massaa kuitulangan valmistusta varten. Aikaisemman kokemuksen perusteella kuitulangan valmistukseen käytettävän kuidun olisi hyvä olla pitkälle fibrilloitunutta ja pitkäkuituista. Tästä syystä kemiallinen kuidutus oli parempi vaihtoehto valmistustavaksi kuin mekaaninen kuidutus.

Keitot tehtiin SCAN-seulotulle murskeelle. Sopivien keitto-olosuhteiden esiselvitys tehtiin sähkölämmitteisellä ilmahaudekeittimellä, johon sijoitettiin 6 kpl yhden litran vetoisia keittopompeja. Yhteen keittopommiin mahtui 100 g mursketta kuivaksi laskettuna. Keittolämpötila oli 155°C ja H-tekijä oli välillä 600 – 1200 B- ja C-murskeilla ja D-murskeella 1000 -1400. H-tekijä yhdistää keittolämpötilan ja keittoajan yhdeksi tekijäksi. Koska B- ja C-murskeiden puulajikoostumusta ei tiedetty tarkasti, kokeiltiin laajaa H-tekijäaluetta. Keitoissa käytetty kemikaaliannos (EA, tehollinen alkaliannos) oli 20 tai 22 % NaOH puusta laskettuna. Keittoliuoksen sulfiditeetti oli 40 %, ja keitoissa käytetty neste-puusuuhde oli 4,5. Täyttönesteenä keittoliemen lisäksi käytettiin vettä. Keiton jälkeen massat pestiin ja lajiteltiin tasolajittimella. Massoista määritettiin saanto ja rejektipitoisuus sekä kappaluku (ISO 302), joka kuvaa massan jäännösligniinipitoisuutta. Jäännösalkalipitoisuus titrattiin potentiometrisesti käyttäen menetelmää SCAN-N 33:94.

Esikokeiden perusteella varsinaisten massaerien valmistusten keitto-olosuhteet valittiin siten, että keitettyjen massojen rejektipitoisuus (keittymättömän jakeen osuus) oli alhainen ja jäännöskemikaalipitoisuus riittävällä tasolla (8-10 g NaOH/l). Suuret massaerät (käytettiin 2 kg mursketta/keitto), valmistettiin pyörivillä 15 l keittimillä. Näille massoille tehtiin samat

jälkikäsitteilyt ja analyysit kuin esikeittojen massoilla sekä lisäksi massoista määritettiin vaaleudet (ISO 2470 modif.), viskositeetit (ISO 5351) ja määritettiin kuitujen puulajikoostumus (mikroskooppinen menetelmä).

4.1.3 Kemiallinen massan valkaisu tässä tutkimuksessa

Keitetyille C- ja D-murskeille tehtiin keiton jälkeen vielä valkaisu. Valkaisun pääasiallinen tarkoitus oli puhdistaa massaa muista epäpuhtauksista ja edelleen pienentää massan ligniinipitoisuutta. Valkaisun myötä saavutetun lisäpuhdistuksen ajateltiin vaikuttavan kuidun ominaisuuksiin siten, että sitoutumiskyky paranee. Tavoitteena oli lisäksi selvittää, miten jätepuussa olevat epäpuhtaudet, esim. metalli, vaikuttavat massan valkaistavuuteen.

Keitetyt C- ja D-murskeet valkaistiin valkaisuusekvenssillä ODEDED, jossa O tarkoittaa happidelignifiointivaihetta, D klooridioksidivaihetta ja E alkaliuuttovaihetta.

Happidelignifiointi tehtiin sekä kelatoidulle että kelatoimattomalle keitetulle massalle. Kelatoinnin tarkoituksena on poistaa metallit massasta. Happidelignifioinnissa metalleista saattaa olla haittaa siten, että happidelignifiointi ei ole selektiivinen, jolloin selluloosa pilkkoutuu, ja tämä näkyy massan viskositeetin rajuna alenemisena. Happivaiheessa viskositeetti laskee kuitenkin aina jonkin verran.

Valkaisuolot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3 Valkaisuolot.

Vaihe	O	D0	E1	D1	E2	D2	SO2
Lämpötila, °C	98	60	60	60	70	70	25
Viive, min	60	60	60	120	60	180	15
Sakeus, %	12	9	9	9	9	9	2,5
Kemikaaliannos, kg/t sellua							
NaOH	17	-	0,9*O ₂ -kappa	0,12*ClO ₂ -annos	8	-	-
ClO ₂ , aCl	-	2*O ₂ -kappa	-	4,5*E1-kappa	-	6	-
Epsom	10	-	-	-	-	-	-
Happipaine, bar	8	-	-	-	-	-	-

Kelatointi tehtiin seuraavissa oloissa:

- Lämpötila 80 °C
- Viive 60 min
- Sakeus 5 %
- Kelatointiaineen annos 3 kg EDTA/t sellua

Jokaisen valkaisu vaiheen jälkeen massa pestiin seuraavasti: massan laimennus 5 % sakeuteen edeltävän vaiheen reaktiolämpötilan lämpöisellä ionivaihdetulla vedellä. Tämän jälkeen massa sakeutettiin ja pestiin vielä kaksi kertaa kylmällä ionivaihtovedellä. Vesimäärä pesussa oli kymmenkertainen massamäärään nähden.

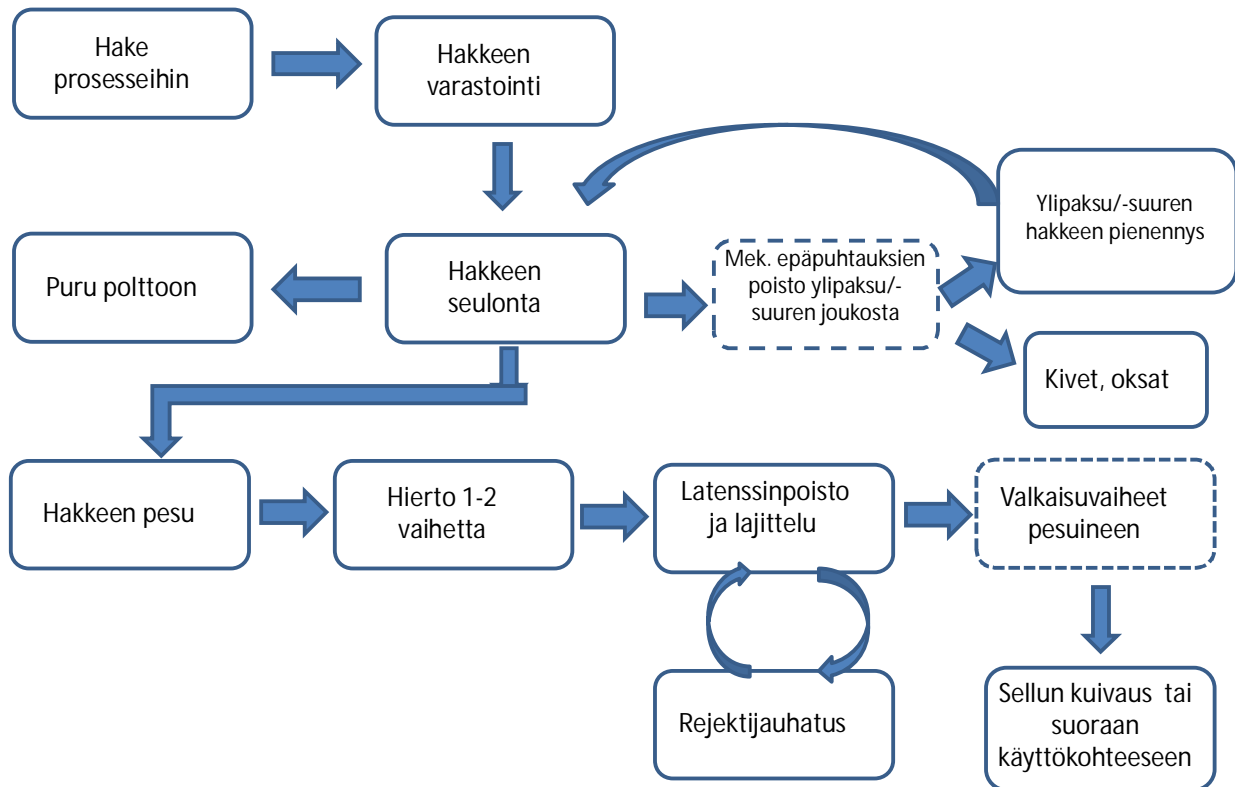
Viimeisen valkaisu vaiheen jälkeen massa hapotettiin SO₂-vedellä jäännöskemikaalin tuhoamiseksi, ja pestiin kuten edellä on kuvattu. Viimeisen pesuvaiheen jälkeen massa sakeutettiin, lingottiin ja homogenoitiin.

Analyysit:

- Gravimetrinen saanto määritettiin happidelignifioinnin ja viimeisen valkaisu vaiheen jälkeen hapotetusta massasta.
- Kappaluku (ISO 302) määritettiin happidelignifioinnin, E1-vaiheen ja viimeisen valkaisu vaiheen (D2) jälkeen hapotetusta massasta.
- Vaaleus (ISO 2470 modif.) mitattiin happidelignifioinnin, E1- ja E2-vaiheiden jälkeen, sekä D2-vaiheen jälkeen hapotetusta massasta.
- Viskositeetti (ISO 5351) määritettiin happidelignifioidusta ja D2-vaiheen jälkeen hapotetusta massasta.

4.1.2 Mekaaninen kuidutus – yleistä

Puuta voidaan kuiduttaa mekaanisesti usealla prosessilla. Hioketta valmistetaan puupölystä hiomalla, ja hierrettä valmistetaan hiertämällä hakemuodossa olevaa raaka-ainetta hierre-levyjen välissä. Murskeena oleva raaka-aine soveltuu hierreprosessiin. Riippuen prosessin lämpötilasta ja siitä käytetäänkö kemikaaleja apuna, puhutaan RMP:stä (hierreprosessi) TMP (kuumahierre) ja CTMP (kemihierre). Prosessiolosuhteet vaikuttavat valmistettavan kuidun ominaisuuksiin ja myös kuitusaantoon. Mitä korkeampi lämpötila ja mitä enemmän kemikaaleja käytetään, sitä pidempää kuitua saadaan ja vähemmän hienoainetta muodostuu. Samalla myös kuitusaanto laskee. Tyypillisesti edellä mainittujen prosessien saannot ovat 85 – 96 %. Eri tavalla valmistetuille kuiduille on erilaiset käyttökohteet. Kuvassa 10 on esitetty TMP:n valmistusprosessi. Puunkäsittelyn (sisältää hakkeenseulonnan) jälkeen hakkeet pestään. Tavoitteena on poistaa mekaanisia epäpuhtauksia ja tasoittaa raaka-aineen kosteusvaihteluita. Myös uuteaineita poistuu tässä vaiheessa. Pestyt hakkeet hierretään yksi- tai kaksivaiheisesti levyjauhimilla tai kartiojauhimilla. Jauhatusvaiheiden määrä riippuu kuidun käyttökohteesta. Hierron jälkeen kuidusta poistetaan kiharuuus ns. latenssinpoistovaiheessa ennen lajittelua. Rejektijae (seulonnessa hylätty jae) hierretään erikseen ja tämän jälkeen hyväksytty jae palautetaan pääkuituvirtaan. Tarvittaessa mekaaninen massa valkaistaan ligniiniä säästävillä kemikaaleilla.



Kuva 10. Mekaanisen massan (TMP:n) valmistusprosessi

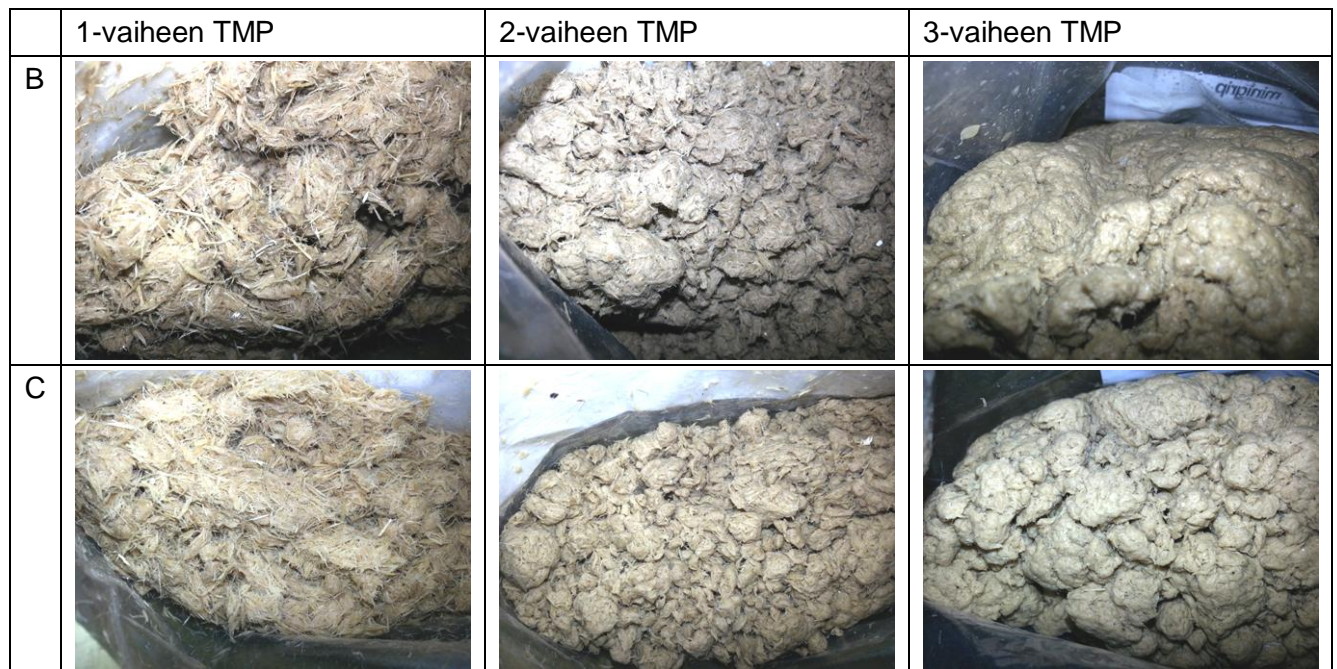
4.1.3 Mekaaninen kuidutus tässä tutkimuksessa

Mekaanisen kuidutuksen tavoitteena oli tutkia jätepuuraaka-aineiden jauhattavuutta (mm. koko, muoto, kuivuus, epäpuhtaudet). Lisäksi tavoitteena oli tutkia karkean termomekaanisesti hierretyn (TMP) jätepuun soveltuvuutta vaahtorainaukseen ja paneelimaisten rakenteiden valmistukseen. Mekaaninen kuidutus suoritettiin B- ja C-luokan näytteille. D-luokan näyte jätettiin hiehtämättä, koska avoimessa jauhatustyössä muodostuu kyllästeainepitoista terveydelle haitallista pölyä.

Perinteisen SCAN-menetelmän mukaisen seulonnan lisäksi jauhatukseen menevästä hakkeesta poistettiin myös Ø34 mm ja Ø23 seulojen ylite, koska pitkien partikkelien kulkemisen jauhinlaitteiston läpi odotettiin olevan ongelmallisia. Jauhatukset tehtiin paineistetulla 12" Sprout Waldron – levyjauhaimella käyttäen kuumahiertämiseen (TMP-prosessi) tyypillisiä jauhatusolosuhteita (Taulukko 4). Levyjauhin simuloi tyypillistä paperiteollisuudessa kuitujen irrotukseen ja fibrillointiin käytettävää laitetta. Molemmille raaka-aineille tehtiin kolme peräkkäistä jauhatusta (läpiajoa) (Kuva 11). Jauhatusvaiheiden ominaisenergiankulutus mitattiin, ja massoista määritettiin kuiva-ainepitoisuus, freeness (suotautumisvastus, ISO 2470 modif.) sekä kuidunpituus (FS-300 kuituanalysaattorilla).

Taulukko 4 Jauhatusolosuhteet

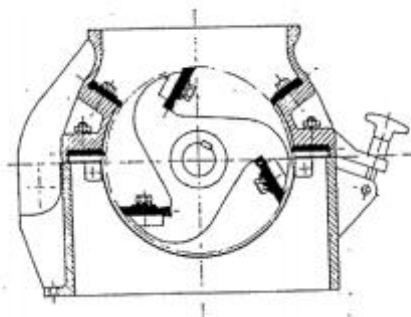
Jauhinterämalli	D2C505
Esilämmitys (1. vaihe)	
• paine	1,8 bar
• aika	1 min
Jauhatuspaine	1 – 2 bar
Kierrosnopeus	2500 rpm



Kuva 11. B- ja C-murskeesta kolmessa vaiheessa jauhetut TMP-massat.

4.1.4 Veitsimylly

Veitsimyllyjä käytetään usein kierrätysmuovin, -paperin ja -kartongin hienontamiseen. Jauhamalla puuta veitsimyllyssä saadaan puupurua. Veitsimyllyssä roottoriin kiinnitetyt veitset katkovat syöttöä staattisia vastakappaleita vasten. Roottorin akseli on vaakatasossa. Kuvassa 12 on esitetty veitsimyllyn poikkileikkaus. /21, 22/



Kuva 12 Veitsimyllyn läpileikkaus /22/

Projektissa testattiin veitsimyllyn soveltuvuutta ominaisuuksiltaan riittävän kuitumassan tuottamiseen. Testeihin otettiin vain C-laatuinen jae, koska se oli raaka-aineominaisuuksiltaan haastavampi kuin B-laatu. Prosessin etuja ovat vedettömyys ja alhainen energiankulutus. Syntynyt materiaali on puupurua (Kuva 13). Hienonnusta varten jätepuunäytettä ei tarvinnut lajitella, ainoastaan silmin havaitut muovi- ja metallikappaleet poistettiin käsin. Raaka-aine seulottiin 4 mm reikäseulalla ennen hienonnusta.

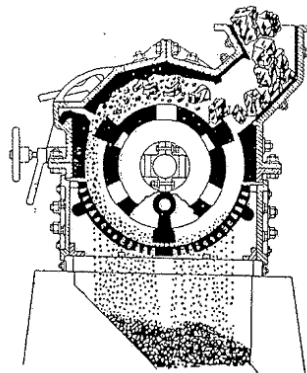


Kuva 13. C-murskeesta veitsimyllyllä (4 mm reikäseula) tehty puupuru.

4.1.5 Muut mahdolliset käsittelymenetelmät

Vasaramylly

Vasaramyllyjä käytetään teollisesti moneen eri tarkoitukseen, muun muassa kuormalavojen ja muiden puujätteiden murskaamiseen hakkeeksi. Vasaramyllyllä voidaan myös murskata puuta hienoksi puupurumateriaaliksi. Vasaramylly koostuu metallirummusta, jossa on hammastettu vuoraus ja rummussa pyörivät jauhatuslevyt, jotka murskaavat ja hienontavat syötön. Rumpuun syötetään murskattavaa ainesta. Rummun pohjalla on sihti, jonka läpi putoaa riittävän hienoksi murskattuja ainesosia. Sihtiä vaihtamalla voidaan vaikuttaa akseptin kokoon. Kuvassa 14 on esitetty vasaramyllyn läpileikkaus. /22/



Kuva 14 Vasaramyllyn läpileikkaus /22/

Kemimekaaninen (CTMP)

Kemimekaaninen kuidutusmenetelmä (kemihierre) on kemiallisen ja mekaanisen massan valmistuksen välimuoto. Kemimekaanisen prosessin aluksi seulottu hake lämmitetään ja pestään. Pesty hake lämpökäsitellään paineellisissa oloissa ja esikäsitellään kevyesti kemikaaleilla ligniinin pehmentämiseksi. Imeytyksen jälkeen hake hierretään yksi- tai kaksivaiheisessa jauhatuksessa, jossa ligniini pehmenee edelleen ja kuidut irtoavat toisistaan. Kemimekaanisen massan kuitujen ominaisuudet ovat mekaanisten ja kemiallisten kuitujen välissä. Kemimekaanisessa massassa on esim. vähemmän hienoainetta kuin mekaanisessa massassa, mutta enemmän kuin kemiallisessa massassa. Kemimekaanisen massan kuitujen ominaisuuksiin vaikuttaa kemiallisen käsittelyn ja jauhatusvaiheiden voimakkuus ja jauhatusvaiheiden määrä. Saanto on 80 – 90 % riippuen kemikaaliannostuksesta sekä puulajista.

4.2 Massojen testausmenetelmät

4.2.1 Kuitulangan valmistus – kemiallisen massan testaus

Viidestä massalaadusta valmistettiin kuitulankanäytteitä, joiden lujuusominaisuudet määritettiin. Kuitulangassa käytetyt massalaadut jauhettiin PFI – jauhimella kahteen jauhatustasoon 10 000 (SR-luku 41-72) ja 26 000 (SR-luku 87-94) kierrosta. Poikkeuksellisesti valkaistu D-murske jauhettiin 10 000 kierroksen sijaan 15 000 (SR-luku 86) kierrosta. Käytetyt massat olivat:

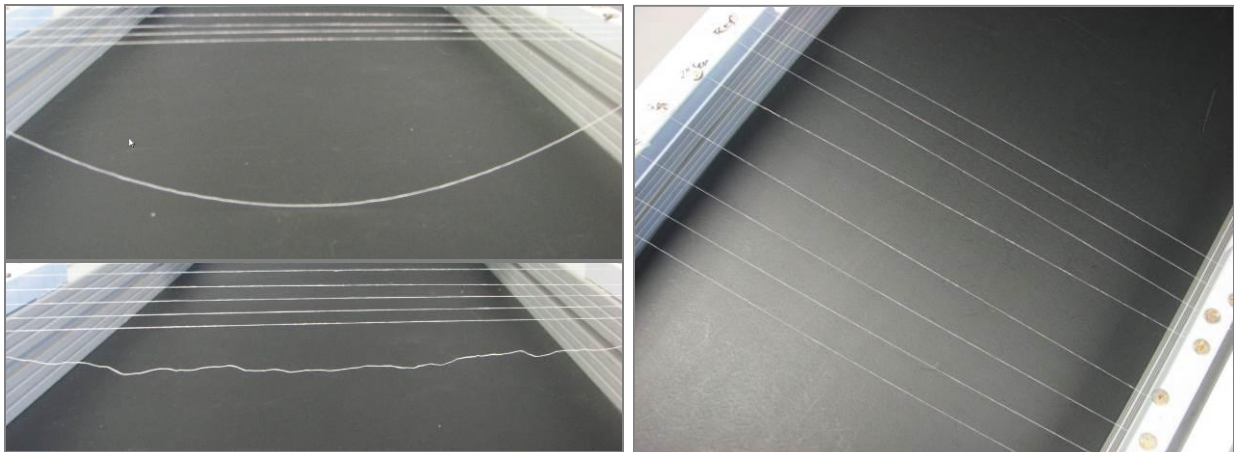
- keitetty B-murske, jauhetun massan SR-luvut 64 & 92
- keitetty C-murske, jauhetun massan SR-luvut 62 & 91
- valkaistu C-murske, jauhetun massan SR-luvut 72 & 92
- keitetty D-murske, jauhetun massan SR-luvut 41 & 87
- valkaistu D-murske, jauhetun massan SR-luvut 86 & 94

Laboratoriolaite kuitulankojen valmistukseen on esitetty kuvassa 15. Laitteella voitiin valmistaa 500 mm pituisia lankoja. Laitteen tärkeimmät osat olivat 1) pumppu kuitususpension syöttämiseen, 2) suutin, 3) suuttimen liikkeentuottaja ja 4) viiraosa vedenpoistoa varten. Laitteessa liikkuvasta suuttimesta pumpattiin kuitususpensiota ja ristosilloituskemikaaleja paikallaan pysyvälle viiralle. Viiralle muodostunut geelimäinen nauha puristettiin kahden tuetun viiran välissä, ja sen jälkeen näyte siirrettiin kuivaukseen. Puristaminen tehtiin liikuttamalla ylempää viiraa, jolloin lanka pyöri puristuksen aikana ja siitä muodostui toivotunlainen poikkileikkaukseltaan pyöreä lanka. Ristosilloituksen tehtävänä valmistusmenetelmässä on vahvistaa märkää lankaa kestäväksi katkeamatta vedenpoistovaihe.



Kuva 15 Laboriolaite kuitulangan valmistukseen.

Lankanäytteet kuivattiin laboratorioilmastossa (lämpötila noin 20 °C, ilman suhteellista kosteutta ei ollut säädetty). Langat kiinnitettiin molemmista päistään kehikkoon (Kuva 16), jossa kutistuman määrää pystyttiin säätämään. Lankojen sallittiin kutistua noin 7 % alkuperäisestä pituudestaan.



Kuva 16 Kehikko lankojen kuivaukseen

Kuitulankanäytteiden paksuudet määritettiin kuvaskannerilla ja kuva-analysimenetelmillä. Esimerkki skannatusta kuvasta on esitetty kuvassa 17. Kuitulankanäytteen poikkileikkauksen oletettiin olevan pyöreä. Yhden koepisteen paksuus laskettiin kymmenen rinnakkaisen lankanäytteen keskiarvona (pituus á 65 mm). C-Impact vetokoelaitetta käytettiin lujuusmittausten suorittamiseen.



Kuva 17 Esimerkki kuitulankanäytteen paksuuden määrittämisestä skannatusta kuvasta.

4.2.2 Paneelimaaiset rakenteet – mekaanisen massan testaus

Mekaanisista massoista valmistettiin vaahtoarkit /4/. Riittävän lujuuden saavuttamiseksi seostettiin karkeat ensimmäisen ja toisen vaiheen TMP-massat (B1, B2, C1, C2) valkaisuamattoman ja jauhamattoman B-laadun jätepuusta tehdyn sellun kanssa suhteessa 50:50. Veitsimyllyllä käsitellystä C-murskeesta ja B-sellusta tehtiin myös arkit suhteella 50:50. Vertailuna mainittakoon, että aikakauslehtipaperin (SC, LWC) valmistuksessa käytetään lujuuden vuoksi 10 - 50 % kemiallista massaa. Aikakauslehtipaperiin käytettävä mekaaninen massa on huomattavasti pidemmälle jauhettua ja sitoutumiskykyisempää kuin tässä projektissa valmistetut karkeat TMP-massat. C1-TMP seostettiin vertailun vuoksi myös kaupallisen valkaistun havusellun kanssa. Valmistettujen arkkien koko oli 20,5*29 cm, neliömassa 800 g/m² ja paksuus 15 mm. Arkeista arvioitiin massojen käyttäytymistä/soveltuvuutta arkkien tekoon. Valmistettujen levyjen jäykkyyttä ja koossapysyvyyttä/lujuutta arvioitiin käsintumalla.

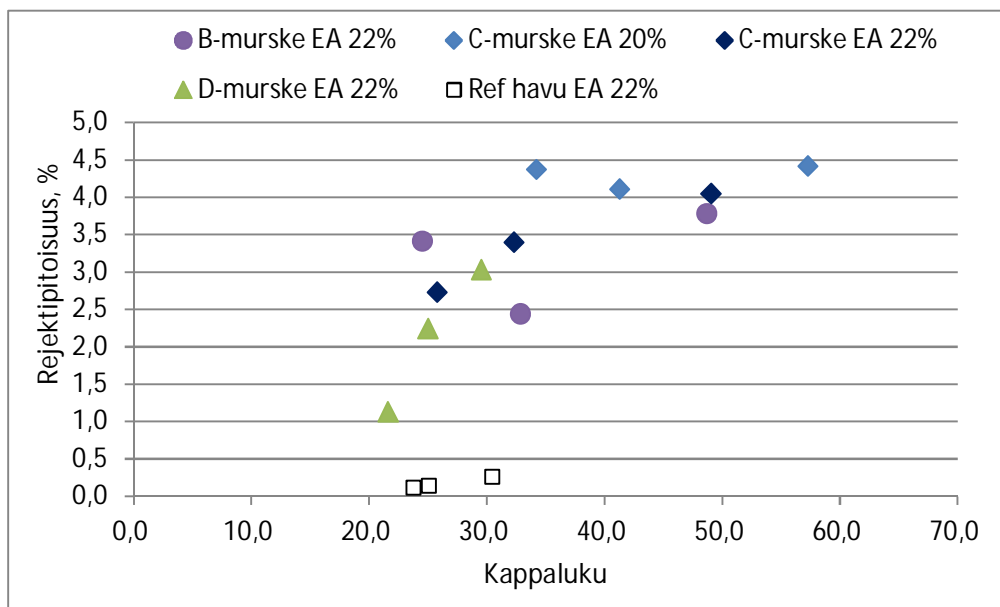
5. Tulokset kokeellisesta tutkimuksesta

5.1 Kuidutustulokset

5.1.1 Kemiallinen kuidutus – keitto

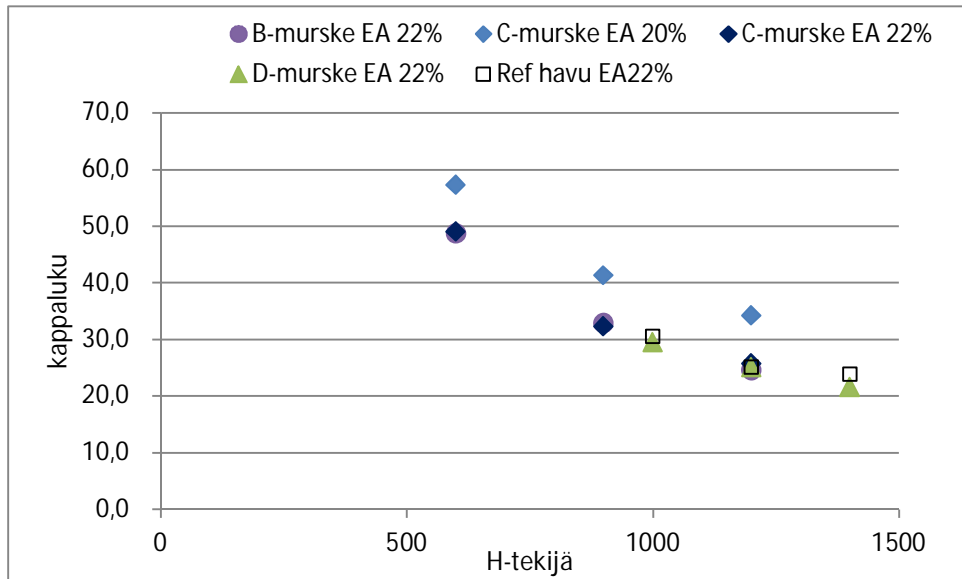
Esikeitot

Esikeitoissa käytetyillä olosuhteilla saavutettiin alimmillaan noin 1 - 2,5 % rejektipitoisuus (keittymättömän jakeen osuus), (Kuva 18). Tämän suuruiset rejektipitoisuudet ovat tehtailla hallittavissa. Johtuen esikeittojen pienestä näytemäärästä rejektipitoisuudet ovat suuntaa antavia. Massojen kappaluvut näillä rejektipitoisuuksilla olivat välillä 20 - 30. Tyypillisesti havukuitu keitetään kappalukuun 25 - 30 ja lehtipuu noin kappalukuun 20. Mitä alhaisempaan kappalukuun keitetään, sitä alhaisemmaksi rejektipitoisuus muodostuu, mutta silloin myös alkaa tapahtua ylikeittymistä, jolloin saanto laskee.



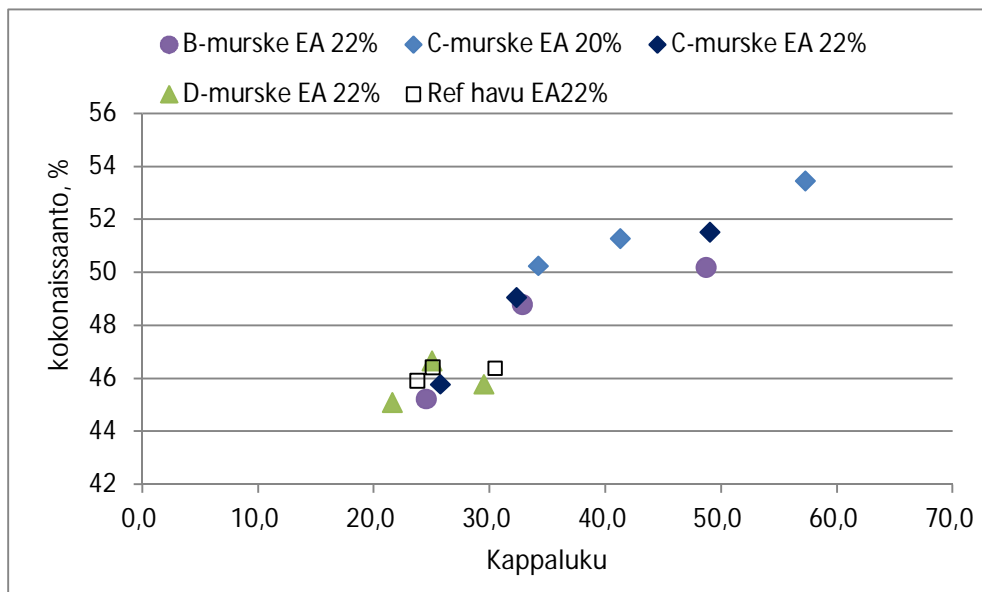
Kuva 18. Esikeittojen rejektipitoisuudet

Tarvittava H-tekijä kappatasolle 20 - 30 oli 1000 - 1400 ja alkaliannos 22 %. Jäännöskemikaalipitoisuus näillä olosuhteilla oli hyvällä tasolla 8 - 12 g NaOH/l. Jos alkalipitoisuus on liian alhainen saattaa keitossa liuennut ligniini saostua takaisin kuidun pintaan, jolloin mm. kuitujen sitoutuminen heikkenee ja massojen valkaistavuus heikkenee. Esikeittojen perusteella päädyttiin suuremmat massamäärät keittämään olosuhteilla H-tekijä 1200 ja EA-annos 22 % kaikilla raaka-aineilla.



Kuva 19. Esikeittojen H-tekijän ja alkaliannoksen vaikutus kappalukuun

Raaka-aineiden kokonaissaannot tällä kappa-alueella olivat noin 45 – 46 % (Kuva 20). Saantotaso oli samaa luokkaa kuin normaalilla havuhakkeella. Lajitellut saannot olivat alhaisempia, johtuen hieman suuremmasta rejektipitoisuudesta.

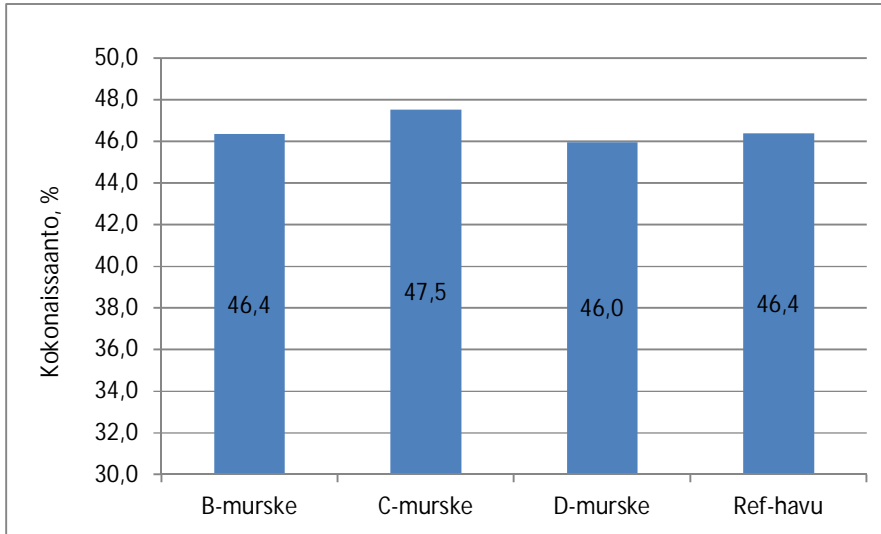


Kuva 20. Esikeittojen kokonaissaannot.

Varsinaiset keitot

Kuitutestauksiin valmistettujen massaerien kappaluvut olivat lähes samat: B-murske 25,2, C-murske 25,4 ja D-murske 24,1. Massojen kokonaissaannot olivat 46 - 47,5 % (Kuva 21). Massoista tehdyn puulajikoostumusanalyysin (Taulukko 5) perusteella osoittautui, että B- ja C-murskeet sisälsivät hieman lehtipuuta, B: 10 % ja C: 13 %, kun taas D-murske oli 100 % havupuuta. Pieni lehtipuupitoisuus voi selittää osittain hieman korkeampaa kokonaissaantoa verrattuna D-murskeeseen. Valmistettujen massojen vaaleudet olivat hieman normaalia

alhaisemmalla tasolla, mikä osaltaan johtunee lähtöraaka-aineen alhaisemmasta vaaleudesta. Massojen viskositeetit olivat keiton jälkeen normaalilla tasolla, 1100 - 1200 ml/g.

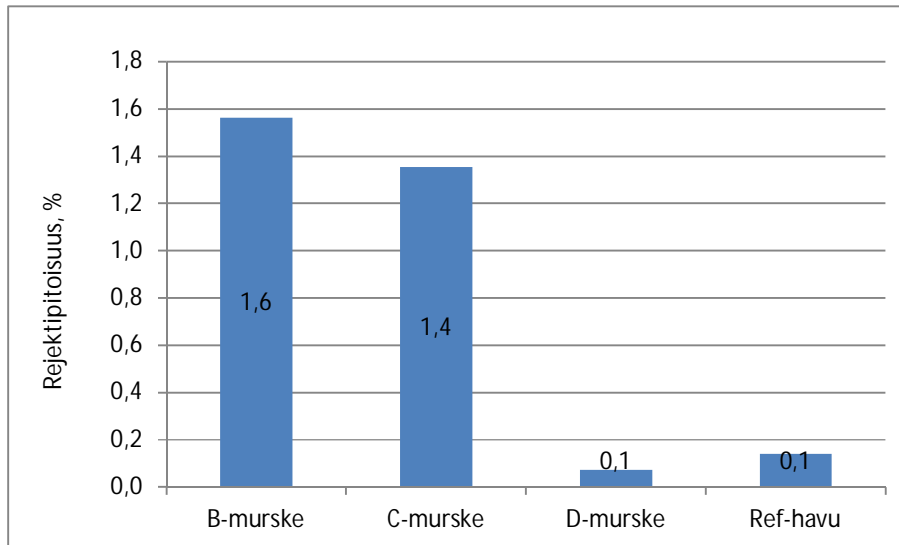


Kuva 21. Testaukseen valmistettujen massojen kokonaiskeittosaannot

Taulukko 5. B- ja C-murskeiden puulajikoostumus

	Kuusi, %	Mänty, %	Lehtipuu, %
B-luokka	66	21	13
C-luokka	67	23	10

Rejektipitoisuudet olivat B- ja C-murskeilla hieman korkeammalla tasolla kuin D-murskeella tai normaalilla havuhakkeella (Kuva 22). Syitä korkeampaan rejektipitoisuuteen ovat lehtipuupitoisuus, joka vaatisi alhaisemman keittokapan, ja oikeista rakennusjätteistä peräisin olevat mekaaniset epäpuhtaudet ja niiden vaikutus raaka-aineen keittymiseen. Mekaanisten epäpuhtauksien määrä ei ollut kovin suuri. Kuvasta 23 nähdään, että massojen joukossa on levyjämiä, hieman kiveä ja hiekkaa sekä muovinkappaleita. Kivet ja vastaavat ovat haitallisia laitteistoille, koska ne kuluttavat laitteita ja saattavat aiheuttaa tukkeumia. Rejektimäärät eivät ole suuria, ja valtaosa rejektistä on puupitoista. Tämän suuruiset, 1,4 – 1,6 %, rejektipitoisuudet ovat hallittavissa tehtaalla tehokkaalla lajittelulla ja puupitoisen materiaalin uudelleenkeittämisellä. Näiden tulosten perusteella sellutehtaan normaalit hakkeen ja massan lajittelurejektin järjestelmät saattaisivat riittää mekaanisten epäpuhtauksien poistamiseksi. Lopullisen varmuuden saamiseksi tulisi tehdä pidempiaikaista raaka-aine ja prosessiseurantaa. Lisäksi murskeen kokoa pienentämällä voitaisiin tehostaa epäpuhauksien erottumista ennen keittovaihetta joko sellutehtaalla seulomalla tai murskeen valmistuksen yhteydessä tehtävällä seulonnalla.

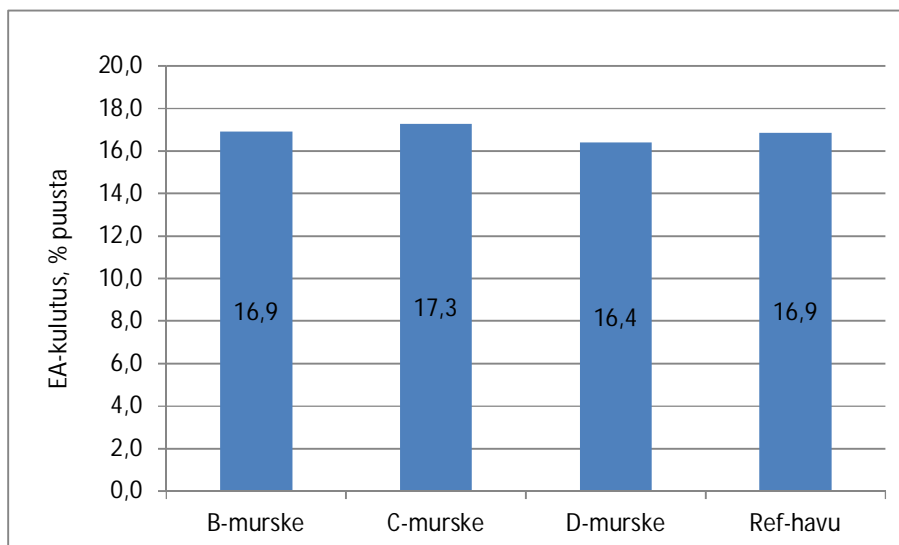


Kuva 22. Testaukseen valmistettujen massojen rejektipitoisuudet



Kuva 23. Keitettyjen B-, C, ja D-luokan murskeiden rejektejä.

C-murskeella keittokemikaalikulutus oli hieman muita suurempi (Kuva 24). Tämä voi johtua siitä, että C-laatu luokan puujätteessä on muita enemmän maalattuja materiaaleja, jotka ovat mahdollisesti lisänneet keittokemikaalin kulutusta.



Kuva 24. Keittokemikaalin kulutus eri murskeilla keitetäessä kappalukuun ~25

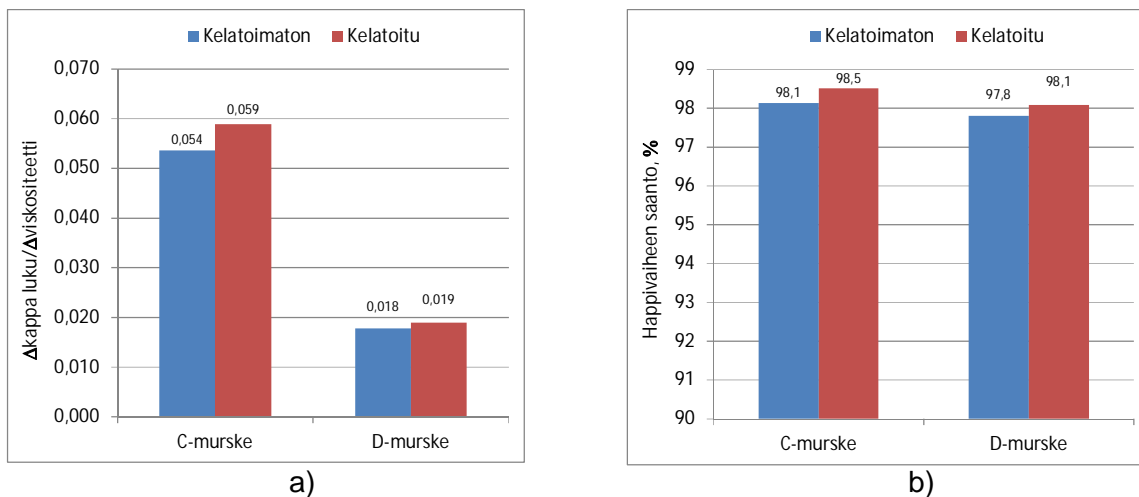
Keittokäyttämisen osalta jätepuut eivät juuri eronneet normaalista kuitupuusta. Jos murskeen palakokoa voitaisiin pienentää, tehostuisi hakkeen palakoon hallinta, ja samalla

mekaanisten epäpuhtauksien erottuminen parantuisi. Tämän työn ulkopuolelle jää pohdinta ja selvitys siitä, miten kemiallisen massan valmistuksessa syntyvää jäännöskeittolientä, mustalipeää, sekä valkaisu suodoksia tulisi jatkokäsitellä. Mustalipeän ja valkaisu suodosten koostumukset pitää selvittää raskasmetallien, liimakomponenttien ja muiden epäpuhtauksien osalta. Ne saattavat aiheuttaa likaantumista saostumalla prosessilaitteiden ja putkistojen pintoihin tai kuidun pintaan, jolloin jatkoprosessointi voi tulla haasteelliseksi. Toimenpiteitä mahdollisten epäpuhtauksien erottamiseksi ja hallitsemiseksi tulee selvittää koostumusanalyysien perusteella. Vasta kun liuoksiin ja suodoksiin liittyvät selvitykset on tehty, voidaan sanoa soveltuvatko B-, C- ja D-luokan puujätteet kemiallisenmassanvalmistukseen.

5.1.2 Kemiallinen kuidutus – valkaisu

Metallien poistovaiheen eli kelatoinnin vaikutus happidelignifointiin

Kuvassa 25 on esitetty kelatoinnin vaikutus happivaiheen selektiivisyyteen (kappaluvun muutos/viskositeetin muutos) eikä gravimetrisen saantoon.



Kuva 25 Kelatoinnin vaikutus happivaiheen a) selektiivisuuteen ja b) gravimetrisen saantoon.

Kuvasta 25 nähdään, että kelatoinnilla ei ollut merkittävää vaikutusta happivaiheen selektiivisyyteen ja gravimetrisen saantoon, joten kokeita päätettiin jatkaa ilman kelatointivaihetta. D-murskeella oli selvästi huonompi selektiivisyys (kappaluvun eli ligniinipitoisuuden muutos/viskositeetin muutos) kuin C-murskeella. D-luokkaan kuuluva jätepuu oli kestopuuta, jonka valmistuksessa on käytetty kuparikyllästettä. Kupari on syy huonoon selektiivisyyteen, koska kuparipitoisuutta ei todennäköisesti saatu riittävän alhaiseksi normaalilla metallin poistovaiheella eli kelatoinnilla.

Valkaisu

Massojen ominaisuudet keiton, happidelignifioinnin ja valkaisuun jälkeen on esitetty Taulukossa 6.

Taulukko 6 Massojen ominaisuudet keiton, happidelignifioinnin ja valkaisuun jälkeen.

	C- murske	D- murske	Havu- sulfaatti	Koivu- sulfaatti
Keitto				
Kappaluku	25,4	24,1	31,9	20,5
Vaaleus, %	29	26	31	34
Viskositeetti, ml/g	1180	1220	1350	1430
Kokonaissaanto % puusta	47,5	46,0	46,5	54,3
Happidelignifiointi				
Kappaluku	15,2	14,5	18,0	13,2
Vaaleus, %	33	28	33	47
Viskositeetti, ml/g	990	580	1130	1240
Happidelignifioinnin saanto, %	98,1	97,8	97,9	98,6
Kokonaissaanto % puusta	46,6	44,9	45,5	53,5
Selektiivisyys (Δ kappa/ Δ viskositeetti)	0,054	0,018	0,063	0,038
DEDED-valkaisu				DEDnD
Kappaluku	0,8	0,7	0,8	0,7
Vaaleus, %	90	90	90	91
Viskositeetti, ml/g	910	580	1060	1230
Valkaisuun saanto, %	97,0	96,7	96,5	95,6
Kokonaissaanto % puusta	45,2	43,5	43,9	51,2
Klooridioksidin kokonaiskulutus, kg aCl/t	51,3	47,5	57,3	41,7
Klooridioksidin kulutus / Δ kappaluku, kg/t	3,6	3,4	3,3	3,3
Klooridioksidin kulutus/ Δ vaaleus, kg/t	0,9	0,8	1,0	0,9

C- ja D-murskeella saavutettiin hyvä loppuvaaleus ja valkaisukemikaalin (klooridioksidin) kulutus oli samaa luokkaa kuin normaalista kuitupuusta valmistetulla sellulla (Havusulfaatti, Taulukko 6). C- ja D-massojen valkaisuun jälkeiset saannot olivat samaa tasoa kuin normaalilla havusulfaattimassalla 44 - 45 % vs. 44 %. Verrattuna normaaliin havu- ja koivusulfaattimassaan, jätepuulla oli selvästi huonompi (pienempi) viskositeetti. Viskositeettiarvo kertoo selluloosan pilkkoutumisesta keitossa ja valkaisussa. Mitä pienempi viskositeetti on, sitä pilkkoutuneempaa on selluloosaketju. Paperisellulla pieni viskositeetti merkitsee yleensä huonompaa paperin repäisyjuuutta. Tässä työssä viskositeetilla ei havaittu yhteyttä kuitulangan lujuuteen.

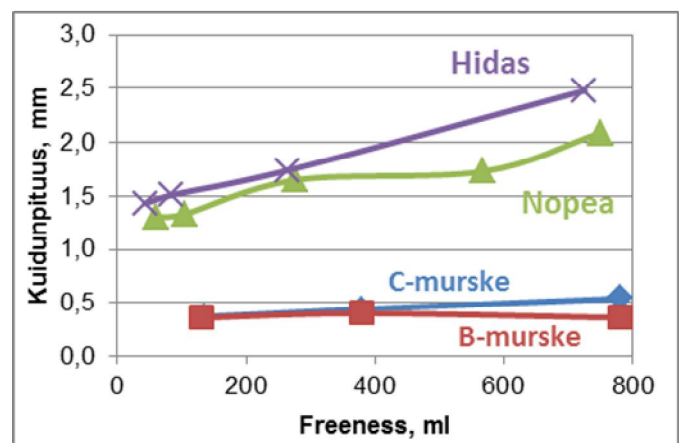
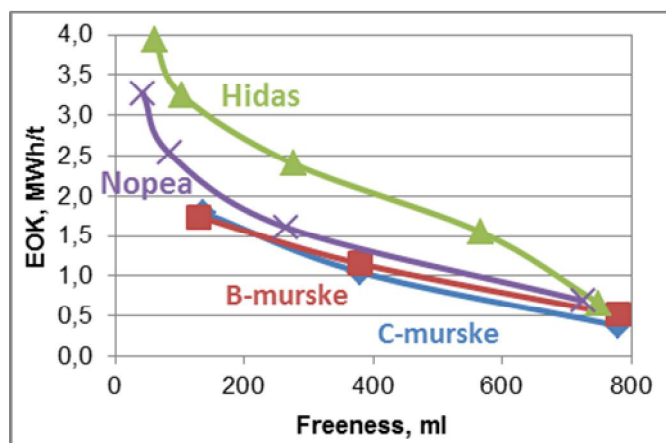
Johtopäätös valkaisusta on, että jätepuusta valmistetulla massalla oli samaa tasoa oleva vaaleus, saanto ja valkaisukemikaalin kulutus kuin normaalista kuitupuusta valmistetulla massalla. Jätepuusta valmistetun massan viskositeetti oli kuitenkin selvästi huonompi kuin normaalin massan.

5.1.3 Mekaaninen kuidutus - hiertäminen

Jauhatuksen energiankulutus oli likimain samansuuruinen B- ja C-murskeella. Myöskään kuidunpituuksissa ei ollut merkittävää eroa. Verrattaessa aiempiin jauhatustuloksiin tuoreella kuusella voidaan todeta, että murskeiden jauhatus kulutti hieman vähemmän energiaa kuin hidaskasvuisesta kuusesta tehty hake. Murskeista valmistettujen massojen kuidunpituus oli merkittävästi alempi kuin tuoreesta kuusihakkeesta tehtyjen massojen, kts. Taulukko 7 ja Kuva 26. Syitä eroihin ovat murskeen korkeampi kuiva-ainepitoisuus, epäpuhtaudet ja raaka-ainekoostumus (erilaisten levyjen ja pahvin palaset, lehtipuuta, mäntyä, jne.) sekä murskeen palakokojakauma. Murskeen pitkänomainen muoto vaikeutti hakkeen kulkeutumista terävällissä, jauhin tukkeentui herkästi ja tuotantonopeutta jouduttiin laskemaan.

Taulukko 7 Jauhatusten energiankulutus (EOK) sekä massojen suotautumisvastus (CSF) ja kuidunpituus.

	B1	B2	B3	C1	C2	C3
EOK tot., MWh/t	0,52	1,15	1,74	0,38	1,05	1,80
CSF, ml	780	380	130	780	380	136
Kuidunpituus, mm	1,5	1,3	1,1	1,8	1,4	1,2



Kuva 26 B- ja C-murskeesta valmistetun kuumahierteen jauhatuksen ominaisenergiankulutus (EOK) ja pituuspainotettu kuidunpituus suotautumisvastuksen (freeness) funktiona. Vertailu hidas- ja nopeakasvuisen tuoreen kuusihakkeen hiertoon.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että murskeista voidaan valmistaa mekaanista kuitua alhaisemmalla energiankulutuksella verrattuna normaalin TMP:n valmistukseen. Valmistuksessa pitää kiinnittää huomiota raaka-aineen palakoon hallintaan. Valmistetun massan kuidunpituus on selvästi pienempi kuin normaalin TMP-massan, mikä saattaa asettaa rajoituksia kuidun käytölle esimerkiksi lujuusominaisuuksien osalta.

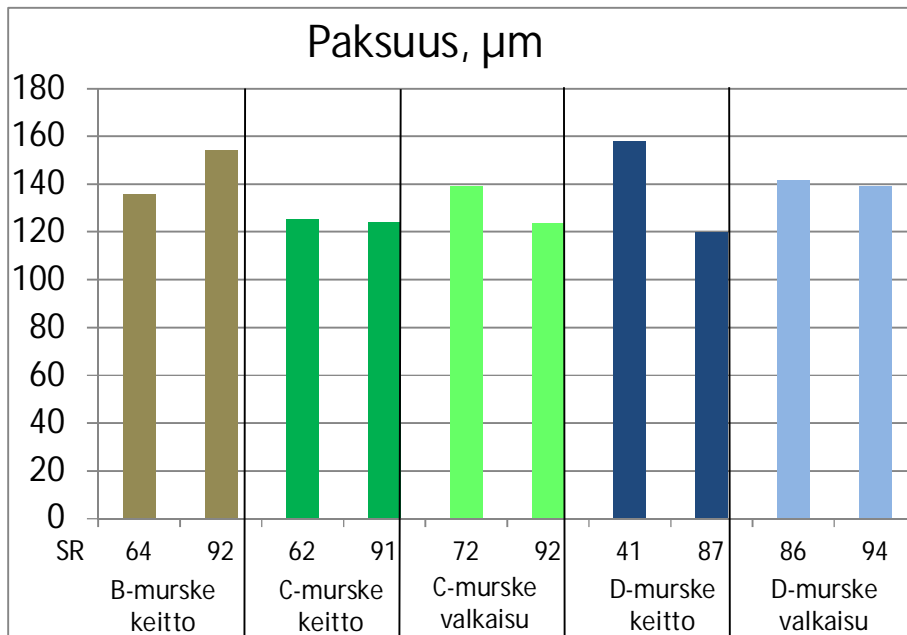
5.1.4 Mekaaninen kuidutus - veitsimylly

Veitsimyllyä (Kamas BAHS 30) ei ollut varustettu energiankulutusmittarilla, mutta voidaan olettaa, että energiankulutus on huomattavasti TMP-jauhatusta alhaisempi. Myllystä ulos tullut kuidutettu puujauhe kulki 4 mm reikäseulan läpi (sopiva jauhe koko saavutettiin tämän kokoisella seulalla). Veitsimyllyllä käsitellystä C-murskeesta ja kemiallisesti kuidutetusta B-laadun sellusta tehtiin vaahtoarkit suhteella 50:50. Massoista ei poistettu mitään ennen jauhatusta vaan ne jauhattiin sellaisenaan.

5.2 Kuitujen testaus

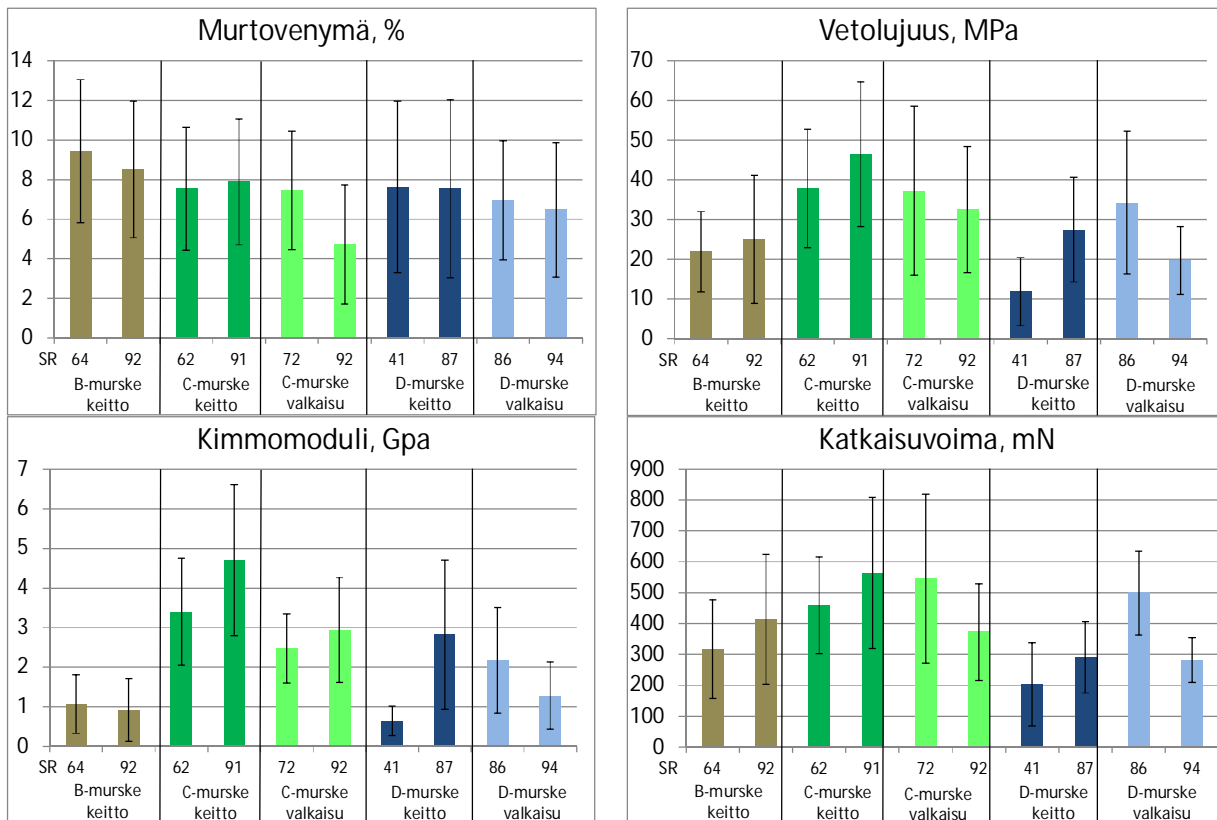
5.2.1 Kuitulanka

Langanteko jätepuuraaka-aineista onnistui hyvin. Halkaisijaltaan kuitulangat olivat noin 130 μm , mikä nähdään kuvasta 27.

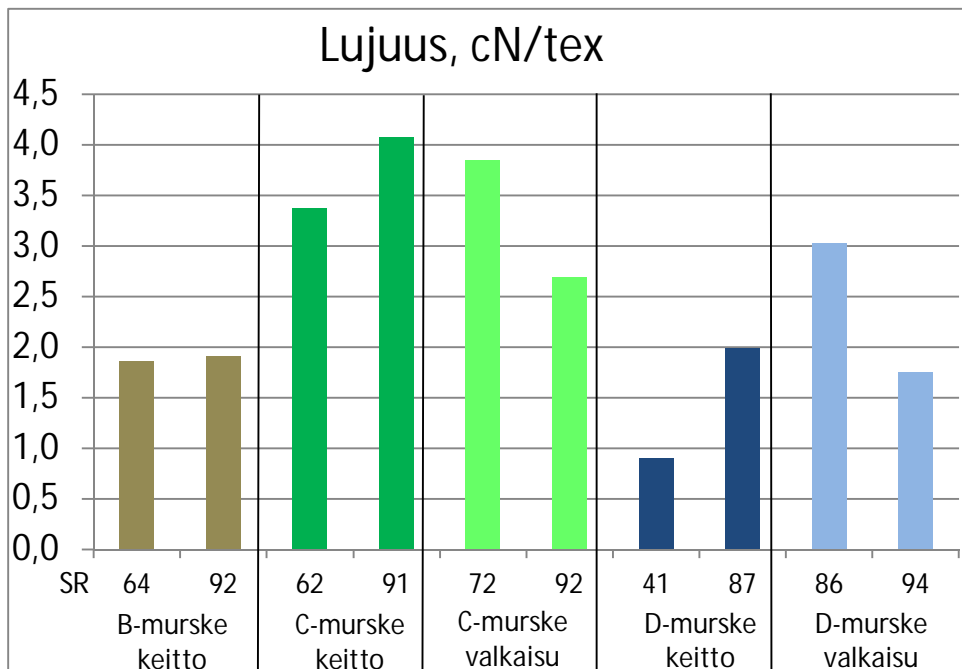


Kuva 27 Kuitulankojen paksuudet

Kuitulangat olivat kohtuullisen vahvoja, mikä nähdään kuvasta 28. Aiemmissä projekteissa tehtyihin saman paksuisiin kuitulankoihin verrattuna langat sijoittuivat lujuudeltaan ja venymältään parhaimmiston. Jätepuuraaka-aineen suuri havusellupitoisuus on todennäköisin syy verrattain hyvään lujuuteen. Kaupallisiin lankoihin verrattuna langat ovat heikkoja, koska ne on tehty yksinkertaisina ilman kiertämistä. C-laadusta tehdyt massat ovat hivenen paremmalla lujuustasolla muihin massoihin verrattuna. Tämän voi havaita parhaiten, kun lujuus on esitetty suhteutettuna pituusmassaan, Kuva 29. Jauhatuksen ei voida sanoa vaikuttaneen lujuusominaisuuksiin. Valmistettaessa lankoja valkaistuista massoista havaittiin geelilangan katkeavan helposti puristettaessa. Puristusvaiheessa täytyi käyttää vähemmän voimaa verrattuna muihin massoihin, että ehjiä lankoja saatiin tehtyä. Kuitulangan valmistusta ei optimoitu erikseen tämän työn materiaaleille.



Kuva 28 A) murtovenymä, B) vetolujuus, C) kimmomoduuli, D) katkaisuvoima.

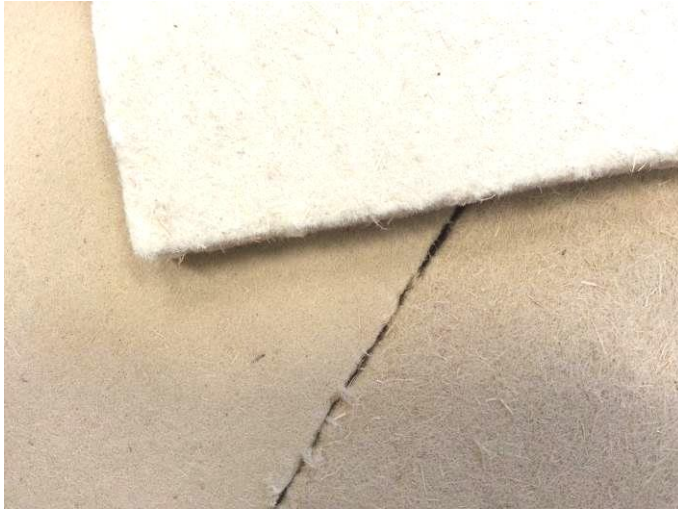


Kuva 29 Kuitulankojen lujuus suhteutettuna pituusmassaan. ($tex = g/km$)

5.2.2 Paneelimaiset rakenteet

Vahtoarkkien valmistus onnistui teknisesti, arkit pysyivät koossa ja olivat riittävän jäykkiä, jotta voitiin todeta jätepuusta saatavien kuitujen olevan sitoutumiskykyisiä ja verrattavissa puhtaasta puusta saatavaan materiaaliin. Kuvista 30 ja 31 nähdään miten karkea kuitu tai puru

antaa arkin pinnalle struktuuria. Valmistetut arkit olivat mekaanisen ja kemiallisen massan seosarkkeja. Jatkossa arkkien valmistusta voitaisiin kokeilla puhtaasta mekaanisesta massasta ja käyttää mahdollisesti apuaineita mukana.



Kuva 30 Karkeasta jätepuu-TMP:stä valmistettuja vaahtoarkkeja.



Kuva 31 Veitsimyllyllä hienonnetusta jätepuu-purusta valmistettuja vaahtoarkkeja.

5.3 Kestopuun käyttö raaka-aineena

Projektin tavoitteena oli selvittää millaista puupohjaista rakennusjätettä voi polttamisen sijaan kuiduttaa ja käyttää uusien kuitupohjaisten materiaalien raaka-aineena (muut kuin paperi- ja kartonkiteollisuuden tuotteet). Kestopuun osalta sekä kemiallinen että mekaaninen kuidutus todettiin teknisesti mahdolliseksi, sillä varauksella, että mekaanisen kuidun käsittely vaatii pientuotannossa huomattavia ja tarkkoja suojautumistoimenpiteitä prosessia suorittavalta henkilökunnalta, koska syntyvä arseenipitoinen puupöly on terveydelle erittäin vaarallista. /23/ Aiemmin kestopuutuotteet sisälsivät arseeniyhdisteitä, mutta nykyisin arseeniyhdisteet on korvattu käyttäjän kannalta vähemmän haitallisilla kupariyhdisteillä. Puunsuoja-aineet luokitellaan biosideiksi ja biosidejä sisältävä jäte on aina vaarallista jätettä. Biosidit ovat kemiallisia aineita, valmisteita tai pieneliöitä, joiden tarkoitus on tuhota, torjua tai tehdä haitattomaksi haitallisia eliöitä, estää niiden vaikutusta tai rajoittaa niiden esiintymistä.

EU-asetus 528/2012 /24/ antaa vaatimuksia koskien biosidejä sisältäviä materiaaleja. Asetus edellyttää mm. että tuotteen sisältämät biosidit on tarkasti nimetty, ja niiden pitää olla voimassaolevan hyväksynnän piirissä. Tämä voi käytännössä hankaloittaa suuresti puunsuoja-aineella käsitellyn jätteen käyttöä, koska alkuperäisen puutuotteen tiedot käytetyistä puunsuoja-aineista eivät välity jätteen hyödyntäjälle. Vaarallisen jätteen käsittelyyn on oltava ympäristönsuojelulain mukainen ympäristölupa, ja hävittäminen on tehtävä todistetusti turvallisesti. Biosidejä sisältävän tuotteen valmistajan on myös todistettava viranomaisille, ettei tuote ole vaarallinen käyttötarkoituksessaan ja etteivät haitalliset aineet leviä ympäristöön.

Demoliteltä saatujen suullisten tietojen perusteella vuonna 2013 heille toimitetusta 23 000 tonnista kestopuujätettä vain n. 5-10 % on kuparipitoista kestopuuta. Loput 90–95 % on edelleen arseenipitoista kestopuujätettä. /15/ Tämä johtaa päätelmään, että kierrätetyn kestopuun käyttö uusissa tuotteissa on teknisesti mahdollista, mutta käytännössä käyttö on toistaiseksi kovin työlästä vaatien erilaisia turvallisuustoimenpiteitä prosessissa, sekä selvityksiä ja luvan hankintoja viranomaisilta.

6. Suuntaa antava teknistaloudellinen arviointi

Kemiallisen ja mekaanisen massan valmistuksen tuotantokustannuksista suurin on raaka-aineesta aiheutuva kustannus. Kuorimattoman puun hinta on tällä hetkellä noin kaksinkertainen jätteen verrattuna. /8,28/

Kemiallisen massan valmistus on energian suhteen omavarainen. Mekaanisen massan valmistuksessa raaka-ainekustannusten jälkeen merkittävin on sähköstä aiheutuva kustannus. Mekaanisen massan valmistuksen tuotantokustannukset ovat kaiken kaikkiaan pienemmät kuin kemiallisen massan, arviolta 2/3 kemiallisen massan tuotantokustannuksista, johtuen pääasiassa mekaanisen massan valmistuksessa korkeammasta saannosta (mekaaninen 90 - 95 % vs. kemiallinen 43 - 45 %).

Tämän työn ulkopuolelle jää pohdinta ja selvitys siitä, miten kemiallisen massan valmistuksessa syntyvää jäännöskeittoliöntä (mustalipeää), sekä valkaisun suodoksia tulisi jatkokäsitellä. Mustalipeän ja valkaisusuodosten koostumukset pitää selvittää raskasmetallien, liimakomponenttien ja muiden epäpuhtauksien osalta. Ne saattavat aiheuttaa likaantumista saostamalla prosessilaitteiden ja putkistojen pintoihin tai kuidun pintaan, jolloin jatkoprosessointi voi tulla haasteelliseksi. Koostusanalyysien perusteella toimenpiteitä epäpuhtauksien erottamiseksi ja hallitsemiseksi tulee selvittää.

Tulevaisuudessa olisi järkevää, että jäteyhtiöt lajittelevat ja murskaavat puujätteen kuten nykyisinkin. Puujätettä uusissa tuotteissa hyödyntävät pk-yritykset ostaisivat raaka-aineen jätteen lajittelijoilta. Tämän projektin tulosten perusteella tarvitaan kuitenkin vielä lisälajittelua ennen kuin jätehake on soveltuvaa kemialliseen kuidutukseen tai mekaaniseen hiertämiseen. Myös jätteen palakoon pienentäminen olisi tarpeen kuidutusprosessien, ja valmistettavien kuitujen tasaisemman laadun varmistamiseksi. Palakoon pienentäminen parantaa todennäköisesti myös mekaanisten epäpuhtauksien erottamista lajitteluvaiheissa. Mikäli pk-yritys päätyy käyttämään kuidutukseen kemiallista menetelmää, olisi yrityksen kannattavaa olla esim. sellutehtaan välittömässä läheisyydessä tai jopa integroituneena sellutehtaaseen, jolloin jäteliemien käsittely olisi helpompaa ja kustannustehokkaampaa. Tämän työn perusteella voidaan olettaa, että periaatteessa kaikki puujättemurskemateriaali on mahdollista käyttää hyödyksi. Jäteyhtiöt voisivat jauhaa murskeen vielä pienemmäksi kuin nykyisin, jolloin betoni ja muut kiviaineosat seuloutuisivat paremmin pois. Lisäksi mahdollisen pk-yrityksen prosessissa käytettävän toisiomurskaimen jälkeen voisi olla vielä seulontavaihe, jolloin jäljellä olevat epäpuhtaudet saataisiin paremmin pois.

Puunjalostusteollisuudessa termomekaaninen puun hiertäminen on vakiintunut tarkoituksenmukaisimmaksi mekaaniseksi sellunvalmistusmenetelmäksi. Tässä projektissa on kuitenkin erilainen lähtötilanne, sillä jätetuuraaka-aine sisältää esipuhdistuksesta huolimatta jonkin verran metalli-, kivi- ja muoviepäpuhtauksia, jotka vahingoittavat kalliita jauhinlevyjä. Lisäksi projektin päämääränä on tuottaa tietoutta mahdollisille jättemateriaalin jalostukseen syntyville pk-yrityksille, jolloin erityyppiset ja -kokoiset myllyt ovat hinnaltaan edullisempia, teknisesti helppokäyttöisiä, eivätkä vaadi vesihöyryn tai kemikaalien käyttöä. Tarkoituksenmukaisia jauhimia ovat vasaramyllyt ja veitsimyllyt.

Veitsi- ja vasaramyllyn energiakulutuksia on vertailtu /25/ jätelavojen jauhamisessa 3-45 mm kokoisiksi paloiksi. Veitsimylly todettiin huomattavasti tehokkaammaksi ja se kulutti samalla 15–30 % vähemmän energiaa tuoteyksikköä kohden. Vasaramylly oli puolestaan kulutusta kestävämpi, sillä veitsimyllyn terät ovat vaurioalttiita, jos jätetuu sisältää paljon nauvoja ja kiviainesta. Näitä tuloksia voi pitää vain suuntaa antavina, koska tämän projektin päämääränä oli saada aikaan sellun kaltaista kuidutettua puuta, joka on pidemmälle kuidutettua kuin edellä mainitussa energiakulutuksen vertailuesimerkissä suoritettu jauhatus.

Valitsimme kokeelliseen testaukseen veitsimyllyn. Veitsimylly pystyi tuottamaan tarpeeksi kuituuntunutta materiaalia paneelimaisten levyjen aikaansaamiseksi. Kuitulangan valmistamiseen materiaali ei olisi sellaisenaan soveltunut.

Taulukko 8 esittää yhteenvedon eri kuidutustavoista ja niiden vaatimuksista.

Taulukko 8 Yhteenvedo eri kuidutustavoista

	Reunaehdot käytölle	Veden ja energian kulutus	Vaatimukset pk-yritykseltä
Kemiallinen kuidutus	liuennneiden kemiallisten epäpuhtauksien vaikutus prosessin toimintaan ja keittoliemen kierrätykseen selvitettävä, raaka-aineen tasalaatuisuus	veden kulutus 10-25m ³ /t sellua, tuottaa energiaa	integroitava sellutehtaaseen, vaatii vahvaa kemiallista osaamista, paljon prosessivaiheita
Termomekaaninen kuidutus	raaka-aineen tasalaatuisuus, kiinteät epäpuhtaudet vahingoittavat laitetta	vesi- ja energiaintensiivinen	vaativa infrastruktuuri, vaatii prosessiosaamista
Kuidutus veitsimyllyllä	kiinteät epäpuhtaudet saattavat vahingoittaa laitetta, pölyn hallinta	vedetön, vaatii vähemmän energiaa kuin vasaramylly	selvitään suhteellisen pienellä investoinnilla, ei vaadi erityisosaamista
Kuidutus vasaramyllyllä	pölyn hallinta	vedetön, energiaintensiivinen	selvitään suhteellisen pienellä investoinnilla, ei vaadi erityisosaamista

7. Johtopäätökset

Tässä projektissa selvitettiin kokeellisesti, kirjallisesti ja haastattelemalla millaista puupohjaista rakennusjätettä voi polttamisen sijaan kuiduttaa uudelleenkäyttöön.

- Jätteenkäsittelylaitokselta saadut B, C ja D luokan jätetuunäytteet soveltuivat hiertämiseen ja kemialliseen kuidutukseen. Murskaus pienemmäksi ja toinen seulontavaihe vähentäisivät epäpuhtauksien määrää
- Veitsimyllyjauhatus ei vaatinut lisälajittelua, vaan jätteenkäsittelylaitokselta saatu murske soveltui sellaisenaan raaka-aineeksi
- Sekä kuitulankaa että vaahtoarkkeja oli mahdollista valmistaa jätetuusta saaduista kuidutetuista massoista. Home tai kemialliset epäpuhtaudet eivät häirinneet kuitujen sitoutumista toisiinsa ja kuidut olivat tarpeeksi pitkiä.

Kemiallisessa kuidutuksessa jätetuussa olleet kemialliset epäpuhtaudet (maalit, puusuoja-aineet yms.) jäävät todennäköisesti jäteliemeen. Jäteliemet, niiden koostumus ja kierrättäminen eivät kuuluneet tämän projektin selvityksen piiriin. Kemialliset epäpuhtaudet vaikuttavat kemikaalien kulutukseen kemiallisessa kuidutuksessa ja voivat liata prosessilaitteita aiheuttaen ylimääräistä huolto- ja puhdistustarvetta..

Suomessa syntyvästä rakennusjätteestä on puupohjaista jätettä 41 %. Huomattava osa tästä jätteestä on ns. huonolaatuista jätettä ja vaikeasti kierrätettävää. Tämän tutkimuksen perusteella sinistymä (home) ei estä kierrätystä ja kivi- ja metalliainekset eivät estä kuiduttamista. Sen sijaan projektissa todettiin, että kierrätetyn kestopuun käyttö uusissa tuotteissa on teknisesti mahdollista, mutta toistaiseksi käytännössä kovin työlästä vaatien erilaisia turvallisuustoimenpiteitä prosessissa sekä selvityksiä ja luvan hankintoja viranomaisilta.

Tämän projektin tuloksia tullaan hyödyntämään EU-hakemuksessa, joka jätetään keväällä 2015. Hakemuksessa ehdotettava tutkimus edesauttaa EU:n tavoitetta nostaa rakennusjätteen kierrätysastetta 70 %:iin vuoteen 2020 mennessä.

Lähdeviitteet

- 1 Rakentamisen materiaalitehokkuuden edistämishjelma, Rakentamisen materiaalitehokkuuden toimenpideohjelmalla valmistelevan työryhmän loppuraportti, 24.10.2013, Ympäristöministeriön raportteja, nro 17/2014
<http://www.ym.fi/download/noname/%7B884F8AF1-4A75-47B4-9494-4296266284B1%7D/92559>, viitattu 19.12.2014
- 2 Alakangas Eija ja Wiik Camilla (2008): Käytöstä poistetun puun luokittelu ja hyvien käytäntöjen kuvaus. VTT. Tutkimusraportti VTT-R-04989-08
- 3 Ilkka Pirhonen ym. (2011): Puutuotteiden kierrätys, Metlan työraportteja 191, <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp191.pdf>, viitattu 19.12.2014
- 4 Patenttihakemus WO 2014/033370, A Method of filtering sludges, keksijät K. Kinnunen et al., VTT
- 5 Patenttihakemus WO2013034814, Method for the manufacture of fibrous yarn, fibrous yarn and use of the fibrous yarn, keksijät Juha Salmela, Harri Kiiskinen ja Antti Oksanen, VTT
- 6 (Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto [verkkopublication]. ISSN=1798-3339. 2012. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 4.11.2014]. Saantitapa:
http://tilastokeskus.fi/til/jate/2012/jate_2012_2014-05-15_tie_001_fi.html, viitattu 19.12.2014
- 7 Lohiniva, E., Sipilä, K. et al., Jätteiden energiakäytön vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin, VTT Tiedotteita 2139, 2002, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2139.pdf>, viitattu 19.12.2014
- 8 Sähköpostikeskustelu Janne Hannula, L&T, 7.11.2014
- 9 <http://www.mobiilimurskaus.com/> viitattu 12.1.2015
<http://www.tanarecycling.com/increase-flexibility/>, viitattu 19.12.2014
- 11 <http://www.doppstadtus.com/?section=DZ750&showFeatures=yes>
- 12 <http://www.hammel.de/en/Products/Secondary-Shredder.html>, viitattu 19.12.2014
- 13 WOOD PROCESSING INNOVATIONS; Yepsen, Rhodes; BioCycle; Feb 2009; 50, 2; ABI/INFORM Complete pg. 25
- 14 www.kestopuu.fi, viitattu 19.12.2014
- 15 Tommi Tähkälä, Demolite Oy, 17.11.2014
- 16 http://www.uusiouutiset.fi/wp-content/uploads/2011/09/uu20116_s10-11.pdf, viitattu 19.12.2014
- 17 Arseenipitoiset suolakyllästeet –OVA-ohje, <http://www.ttl.fi/ova/ccakyll.html>, viitattu 19.12.2014
- 18 <http://fi.wikipedia.org/wiki/Kupari>, viitattu 19.12.2014

- 19 Willför, S., Alén, R., van Dam, J., Liu, Z. ja Tähtinen, M. Raw materials. Chemical Pulping part1, Fiber Chemistry and Technology. Toim. Pedro Fardim, Julkaisija Paper Engineers' Association, Paperi ja Puu Oy., Porvoo 2011, pp. 120.
- 20 Klemetti, U, Kortelainen V-A, Lyytikäinen, J. Siitonen, H. Sironen, R. Paperimassan valmistus, toim. Seppälä, M., Julkaisija Opetushallitus, Helsinki 1999, pp. 31.
- 21 Bitra, V. S.P. et al. Direct measures of mechanical energy for knife mill size reduction of switchgrass, wheat straw, and corn stover; Bioresource Technology 100 (2009) 6578–6585
- 22 Poropudas, M., Polyvinyylikloriidiin (PVC) kierrätys ja uusiokäyttö, Diplomityö, Tampereen Teknillinen yliopisto 2011
- 23 Kestopuun käyttöturvallisuuustiedote, http://www.kestopuu.fi/tiedostopankki/139/Kayttoturvallisuusohje_Cu_kyllastetty_puutavara2012_2.pdf, viitattu 19.12.2014
- 24 Regulation (EU) No 528/2012, luku XVIII Käsitellyt esineet, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0528&from=EN>
- 25 Spinelli et al., Performance and energy efficiency of alternative comminution principles: Chipping versus grinding, Scandinavian Journal of Forest Research, Published online: 18 Jan 2012
- 26 Mäkelä, M., Lipponen, K. ja Sainio, M. Tyvilahoa sisältävän kuusen määrä, laatu ja käyttömahdollisuudet sellun raaka-aineena. Metsätehoraportti 50, 1998, 29 s.
- 27 Varhimo, A. and Tuovinen, O. Raw materials. Mechanical pulping. Papermaking Science and Technology. Book edit Sundholm J. Series edit. Gullichsen and Paulapuro, Pub. Fapet Oy, Helsinki, Finland, 1999, ss. 67-104.
- 28 Kangas, P., Kaijaluoto, S., Varhimo, A., Asikainen, S., Määttänen, M., Robertsen, L. Future Pulp Mills – Energy Mill Concept Evaluation. VTT Research Report VTT-R-00069-12 (Confidentiality: restricted), 2013, 53 p.

Liite Aiheeseen liittyviä EU-projekteja ja linkkejä niihin

Demowood (2009-2013), WoodWisdom. The general aim of the project was to investigate valorisation concepts for maximising the added value of waste wood in value chains such as pulp production for paper products, particle board production and large scale energy recovery systems, <http://www.wwnet-demowood.eu/>

EU-HISER (2014-2018). The main objective in HISER is to develop and demonstrate novel cost-effective holistic solutions (technological and non-technological) for a higher recovery of raw materials from ever more complex C&DW by considering circular economy approaches throughout the building value chain (from the End-of-Life Buildings to new Buildings).

WoodRub (2010-2014), osittain EU-rahoitteisessa projektissa on tutkittu jätteenkäsittelyä puun sekä kumin käyttöä uusina komposiittituotteina.
http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&_proj_id=3650

CleanWood (2006-2010) EU-projektissa on pureuduttu pitkälti jätepuun puhdistusongelmiin.
http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&_proj_id=3062&docType=pdf,
http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE06_ENV_IRL_000532_LAYMAN.pdf

IRCOW (2011-2014) EU-projekti, jossa on katsottu erilaisten jätteiden syntymistä, lajittelua ja innovoitu prosesseja uudelleen käyttöön rakennusmateriaaleina <http://www.ircow.eu/>