

Rakennus- ja purkupuusta valmistettujen tuotteiden tuoteturvallisuus (RAPUPUU) LOPPURAPORTTI



 **LUT
University**

 **LAB University of
Applied Sciences**



Ympäristöministeriö
Miljöministeriet
Ministry of the Environment

**Marko Hyvärinen
Timo Kärki
Kristiina Lillqvist**

**LUT-yliopisto
LAB-ammattikorkeakoulu
2021**

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	6
2 Kierrätyspuun (C/D) virrat ja niiden maantieteellinen sijoittuminen	7
2.1 C-puun koostumus	8
2.1.1 Ikkunat	8
2.1.2 Ovet.....	8
2.1.3 Komposiitit	9
2.2 D-puun koostumus.....	9
2.3 C/D-puun määrät Suomessa	11
3 Puujätteenkäsittelyn logistiikka, erottelu ja lajittelu	14
3.1 Kyllästetyn puun EDS-mittaukset.....	14
3.2 Kyllästetyn puun XRF-mittaukset.....	16
3.3 Kyllästetyn puun lajitteluteknologiat.....	16
3.3.1 XRF	17
3.3.2 LIBS.....	17
3.3.3 NIR.....	17
3.3.4 Teollinen lajittelu	18
4 Rakennustuotteissa käytetyt aineet	20
4.1 Rakennus- ja purkupuumateriaalissa esiintyvät nykyisin säädellyt ja haitalliset aineet	20
4.2 Arsenia sisältävän CCA-kyllästetyn puun uudelleenkäyttö.....	22
4.3 Kierrätyspuun käyttöä ohjaava lainsäädäntö ja säännökset	22
5 Tuotteiden koevalmistus ja pilotointi	24
5.1 Komposiittituotteet ja -rakenteet.....	24
5.1.1 Puristuslujuus.....	26
5.1.2 Säänkestävyys	27
5.1.3 Emissiot	28
5.1.4 Liukoisuus.....	29
5.1.5 Koetuotteet.....	30
5.2 Massiivipuutuotteet ja -rakenteet	30
5.2.1 Liimaus	31
5.2.2 Pintakäsittely.....	34
6 Uusien tuotteiden muotoilu ml. modulaarisuus sekä testaus.....	37
6.1 Tuotekehitysaihioita	38
6.3 Huonekalusarja	40

7 Viestintä	41
8 Yhteenveto	44
Lähteet	47

Lukijalle

Tämä loppuraportti on kooste LUT-yliopiston, LAB-ammattikorkeakoulun ja Demolite Oy:n *Rakennus- ja purkupuusta valmistettujen tuotteiden tuoteturvallisuus (RAPUPUU)* –hankkeessa tekemästä tutkimustyöstä, jossa selvitettiin puupohjaisten rakennus- ja purkujätteestä sekä kyllästetystä puusta valmistettujen tuotteiden tuoteturvallisuutta ja demonstroidaan pilottituotteiden kautta käyttökelpoisuutta eri teollisissa käyttökohteissa.

Tutkimushankkeen tavoitteena oli edistää kiertotalouden, jätteettömän maailman ja vähähiilisyyden periaatteiden toteutumista, luoda uudenlainen, teolliseen toimintaan soveltuva toimintatapa, joka on resurssiviisas ja vähähiilinen ja jonka avulla C/D-luokan kierrätyspuuta voidaan kierrättää nykyistä enemmän ja resurssitehokkaammin, palauttaa entistä enemmän jättemateriaaleja uuteen, korkeamman jalostusasteen käyttöön, pyrkiä myös osoittamaan käytännön esimerkkien ja tuotteiden avulla mahdollisuuksia, joita liittyy materiaalien uusiokäyttöön.

Tässä raportissa esitellään tutkimustuloksia suoritetuista materiaalitestauksista C- ja D-luokan purkupuusta valmistetuille puu- ja komposiittituotteille. Materiaaliteknisellä tutkimuksella pyrittiin selvittämään ja arvioimaan purkupuun käyttökelpoisuutta ja tuoteturvallisuutta erilaisissa tuotesovelluksissa.

Kiitämme hankkeessa mukana olleita yrityksiä ja muita yhteistyökumppaneita rakentavasta yhteistyöstä. Hankkeen julkisena päärahoittajana on toiminut Ympäristöministeriö ja sen Puurakentamisen ohjelman Kasvua ja kehitystä puusta -tukiohjelma.

Lappeenranta 24.6.2021

Tekijät

1 Johdanto

Suomessa syntyy vuosittain useita miljoonia tonneja puujätettä. Puujätteen koostumuksessa esiintyy hyvinkin paljon vaihtelua toimialakohtaisesti. Jotta syntyvän puujätteen tunnistamiselle olisi yhtenäiset kriteerit, joilla voidaan osoittaa ja erottaa ns. puhdas puu epäpuhtauksia sisältävästä jättepuusta, julkaistiin vuonna 2014 VTT:n, Bioenergia ry:n, Energiategollisuus ry:n ja Metsäteollisuus ry:n yhteistyönä tehty laatuluokittelu *Käytöstä poistetun puun luokittelun soveltaminen käytäntöön – VTT-M-01931-14*. Kyseinen luokittelu on ennen kaikkea tarkoitettu jättepuuta tuottavien ja prosessoivien toimijoiden tarpeeseen, mutta myös viranomaiskäsittelyn avuksi esimerkiksi lupakäsittelyissä ja raportoinneissa. Luokittelussa keskitytään puujätteeseen, joka on kemiallisesti käsiteltyä tai voi sisältää epäpuhtauksia (Alakangas et al. 2014).

Käytöstä poistetun puun luokittelun mukaisesti puujäte voidaan ”puhtausasteen” mukaisesti jakaa neljään eri luokkaan; A, B, C ja D. ”Puhtaimpaan” eli A luokkaan kuuluva puujäte on käsittelemätöntä puuta esimerkiksi saha- tai levyteollisuudesta, pakkauksista tai metsänhoidollisista toimenpiteistä. Vastaavasti luokkaan B määritellään kuuluvaksi puujäte, jota on kemiallisesti käsitelty esimerkiksi pinnoittamalla, maalaamalla tai lakkaamalla. Tyypillisiä lähteitä luokan B puujätteelle ovat esimerkiksi puusepän- ja rakennusteollisuus. Yleisesti purkupuu tai puujäte, jonka alkuperän toteaminen on hankalaa, kuuluvat luokkaan C. Kyseiseen luokkaan kuuluva puutähde sisältää tyypillisesti maaleja, pinnoitteita, orgaanisia halogenoituja yhdisteitä, kuten fluoria (F), klooria (Cl), bromia (Br) tai jodia (I) sisältäviä yhdisteitä, metallisia kiinnikkeitä, lasia sekä mahdollisesti myös muovia ja muuta purkujätettä. Luokkaan C määritetään kuuluvaksi myös puumuovikomposiitit. Käytöstä poistettu kyllästysaineilla käsitelty puu, kuten kestopuutuotteet sekä sähkö- ja puhelinpylväät, luokitellaan vaaralliseksi jätteeksi, joka määritellään kuuluvaksi luokkaan D.

Käytöstä poistetun C/D-luokkaan kuuluvan puujätteen hyödyntämisestä ja käsittelymenetelmistä todetaan, että luokkaan C kuuluva puujäte tulisi ensisijaisesti lajitella jätteeksi, johon noudatetaan jätteenpolttoasetuksen normeja. Toisena vaihtoehtona on todistaa analyysin, ettei epäpuhtauksien taso ylitä annettuja raja-arvoja esimerkiksi rikin, kloorin, typen ja raskasmetallien osalta, jolloin puu voidaan käsitellä luokkaan B kuuluvana puujätteenä. Purkupuu kuuluu kuitenkin aina luokkaan C, mikäli ei voida laatuja järjestelmän avulla tai ominaisuustiedoin osoittaa, että purkupuu on kemiallisesti käsittelemätöntä. Luokkaan D kuuluvan puujätteen eli kyllästetyn puun osalta hävittämisessä on noudatettava voimassa olevaa lainsäädäntöä (Alakangas et al. 2014).

RAPUPUU-hankkeessa tutkittiin vaikeasti kierrätettävien purkupuujakeiden, kuten kyllästetyn puutavaran, materiaalihyötykäyttöä. Vaikka nykyisin käytössä olevat kyllästysaineet ovatkin ympäristön kannalta vähemmän haitallisia, kerätään kyllästetty puutavara erikseen suomalaisen puunkyllästysteollisuuden ja kuntien ylläpitämiin kierrätyspisteisiin ja kuljetetaan pääosin ulkomaille energiantuotannon raaka-aineeksi. Kyseistä jättemateriaalia onkin tavoitteena palauttaa entistä enemmän uuteen, korkeamman jalostusasteen käyttöön edistäen kiertotalouden, jätteettömän maailman ja vähähiilisyyden periaatteiden toteutumista.

2 Kierrätyspuun (C/D) virrat ja niiden maantieteellinen sijoittuminen

EU:n jätedirektiivi edellyttää, että vuoteen 2020 mennessä jäsenmaiden on kierrätettävä 70 % rakennus- ja purkujätteistä materiaalina. Tällä hetkellä Suomessa ei kuitenkaan ole toimijoita, jotka hyödyntäisivät merkittäviä määriä purku- ja rakennuspuujätettä materiaalina, vaan käytöstä poistettu puutavara poltetaan käytännössä energiaksi (Häkämies et al. 2019). Rakennus- ja purkujäte on rakentamisen kohteissa syntyvää jätettä, joka koostuu lähinnä maa- ja kiviaineksista, puu-, metalli-, muovi-, paperi- ja pahvijätteistä. Se ei sisällä vaarallista jätettä, joka käsitellään aina erillään muista jätteistä. Rakennus- ja purkujätettä syntyy Suomessa vuositasolla yli 2 miljoonaa tonnia ilman maamassojen huomioimista. Kyseisestä määrästä puujätteiden osuus on noin 400 000 tonnia (Tilastokeskus 2020a). Vuonna 2019 Suomesta vietiin ulkomaille noin 301 000 tonnia EY:n jätteensiirtoasetuksen (JSA) 1013/2006 mukaisella jätteensiirtoluvalla valvottavaa jätettä, josta noin 60 % oli vaarallista jätettä sisältäen mm. käsiteltyä puujätettä sekä rakennus- ja purkujätettä. (Ympäristö 2020)

Jättemäärien tilastoinnissa pohjana käytetään käsittelylaitokselle vastaanotetuiksi kirjattuja jättemääriä ja jätteenkäsittelypaikkaan edelleen lähetettyjä jättemääriä. Jättemäärien tilastoinnista vastaa Tilastokeskus, joka pyrkii poistamaan mahdolliset päällekkäisyydet tilastoinnissa. Tilastoiduissa puujättemääriissä saattaa esiintyä eroavaisuuksia johtuen esimerkiksi käsittelylaitoksille päätyvästä materiaaliirroista, jolloin kyseiset määrät eivät kirjaudu mukaan virallisiin tilastoihin. Suomessa rakennus- ja purkupuujätteiden määrät tulee ilmoittaa jäteluokittain ja alkuperäsektoreittain kansalliseen ympäristönsuojelun tietojärjestelmään (YLVA). Tämä ilmoitusvelvollisuus koskee kaikkia niitä toimijoita, joiden lupaviranomainen on Aluehallintovirasto. Näitä ovat lähinnä suurimmat rakennus- ja purkujätteen käsittelylaitokset. YLVA-järjestelmästä puuttuu merkittävä osa niiden rakennus- ja purkujätteen käsittelylaitosten jätetiedoista, jotka

toimivat kuntien ympäristönsuojeluviranomaisten myöntämien ympäristölupien alaisina. Samoin tilastoista puuttuvat ne puujätteet, jotka toimitetaan suoraan työmailta energiantuotantolaitoksiin (Häkämies et al. 2019).

2.1 C-puun koostumus

Käytöstä poistetun puun luokittelun mukaisesti luokkaan C määritellään kuuluvaksi rakennus- ja purkupuun, jonka koostumus ja sisältö vaihtelee merkittävästi. Luokan C puujätteessä esiintyvät epäpuhtaudet voidaan jakaa mekaanisiin ja kemiallisiin epäpuhtauksiin. Mekaanisiin epäpuhtauksiin luokitellaan kuuluvaksi purkupuussa olevat maa-ainekset ja kivet sekä muut materiaalit kuten metalli, muovi, betoni ja lasi. Nämä edellä mainitut epäpuhtaudet on yleensä mahdollista erottaa puumateriaalista lajittelulla tai muilla prosessointimenetelmillä. Kemialliset epäpuhtaudet, kuten maalit, pinnoitteet, puunsuoja-aineet ja liimat, ovat tyypillisesti kiinteänä osana puumateriaalia, jolloin niiden erottaminen ja poistaminen on hyvin vaikeaa (Alakangas et al. 2014). C-luokkaan kuuluvan puujätteen lähde on tyypillisesti rakentaminen ja kotitalous. Varsinkin purkukohteista syntyy merkittäviä määriä purkupuuta ovien, ikkunoiden, kalusteiden ja rakenteiden muodossa. Myös puumuovikomposiitit luokitellaan kuuluvaksi kierrätyspuun luokkaan C.

2.1.1 Ikkunat

Ikkunoiden rakenne ja niissä käytettävät materiaalit ovat muuttuneet aikojen saatossa merkittävästi. Aiemmin ikkunat olivat puhtaasti puurunkoisia, mutta nykyään ikkunarakenteissa, ennen kaikkea ulkopuitteissa, käytetään puun ohella myös muita materiaaleja kuten alumiinia ja puumuovikomposiitteja. Nykyisissä teollisesti valmistetuissa ikkunoissa yleisin rakenne on puun ja alumiinin yhdistelmä. On kuitenkin oletettavaa, että puu-alumiini-ikkunoiden osuus C-puuvirrassa on erittäin marginaalinen, sillä tyypillisesti purku- tai saneerauskohteiden ikkunat ovat useamman vuosikymmenen ikäisiä.

2.1.2 Ovet

Rakennuksissa käytettävät ovet voidaan luokitella monella eri tavoin. Yksi tyypillisimmistä on ovien jaottelu käyttötavan pohjalta ulko-oviin ja sisäoviin (välioviin). Merkittävin eroavaisuus näiden välillä on ovien perusrakenteessa ja niissä käytettävissä materiaaleissa. Sisäovet voidaan jaotella rakenteensa perusteella laaka- tai kehysoviin. Noin 80 % valmistettavien väliovien määrästä on

laakaovia. Jossain määrin sisäovina käytetään myös ikkunaovia, joissa kehyksen sisäpuolella on lasinen osa. Tilankäytännöllisten syitten takia perinteisiä sisäovia voidaan tarvittaessa korvata esimerkiksi puurakenteisilla liuku- tai taiteovilla. Ulko-ovet ovat puolestaan tyypillisesti kehysovia tai ikkunaovia. Laakaoven rakenne muodostuu kerroksittain liimatuista pintalevyistä, täyteaineista sekä ovea reunustavasta kehäpuusta. Myös laakaoveen on mahdollista tehdä lasiaukko. Kehysovessa ovilevyn kantavana osana on puurakenteinen jäykkä kehys. Peiliovissa kehys on usein näkyvässä, mutta se voi olla verhoiltu esimerkiksi paneelilla tai HDF- tai MDF-levyllä. Perusrakenteeltaan peiliovet on säilyneet vuosikymmeniä jokseenkin samana. Merkittävin ero lienee siirtyminen umpipuupeileistä viilutettujen levyjen käyttöön valmistuskustannusten pienentämiseksi (Auvinen et al. 2002, SIT 32-610076 2010).

2.1.3 Komposiitit

Komposiitilla tarkoitetaan kahden tai useamman materiaalin yhdistelmää, jossa materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole sulautuneet tai lienneet toisiinsa. Vahvistava materiaali on usein kuiduista tai hiukkasista koostuvaa ainesta, joka sulautetaan matriisimateriaaliin. Komposiittimateriaalien käyttö rakentamiseen ja asumiseen liittyvässä teollisuudessa on globaalisti vahvassa kasvussa. Suurinta volyymia tällä hetkellä maailman markkinoilla edustavat ns. decking-materiaalit, joissa komposiittituotteita käytetään korvaamaan esimerkiksi perinteisiä painekyllästettyjä puutuotteita. Tyypillinen esimerkki tällaisesta tuotteesta on puumuovikomposiittinen terassilauta, jonka pääraaka-aineina käytetään puuta tai puumaista ainesta sekä kesto- tai kertamuoveja.

Puumuovikomposiiteissa puumateriaalin osuus on tyypillisesti noin 30–80 % valmistajasta ja tuotteesta riippuen. Puumateriaalina käytetään useimmiten sahanpurua tai puuteollisuuden jatkojalostuksen sivutuotteista valmistettua puujauhoa. Materiaalina voidaan käyttää myös jäte- tai kierrätyspuuta, metsähaketta tai pellettejä. Myös muovit voivat olla kierrätysmuoveja eri lähteistä. Vain vaativissa sovelluskohteissa käytetään neitseellisiä muoveja komposiittien valmistukseen. Päämateriaalien eli puun ja muovin ohella puumuovikomposiiteissa käytetään myös pieniä määriä erilaisia täyte- ja lisäaineita, joilla vaikutetaan tuotteen materiaaliominaisuuksiin sekä valmistusprosessiin.

2.2 D-puun koostumus

Kuten aiemmin todettua käytöstä poistetun puun luokittelussa puunkyllästysaineilla käsitelty puu määritellään kuuluvaksi luokkaan D. Kyllästetty puu luokitellaan vaaralliseksi jätteeksi, jonka vuoksi sen käsittelyssä tulee noudattaa annettuja turvallisuusohjeita. Mikäli kyllästettyä puutavaraa

joudutaan työstämään, käytetyn kyllästysaineen mukaan tulee varustautua tarvittavin suojausmenetelmin ja suojaruuvarein. Kyllästettyä puuta voidaan työstää tavanomaisilla puuntyöstömenetelmillä. Suosituksen mukaan työstö tulee tehdä mahdollisimman pitkälle ennen kyllästämistä tai vaihtoehtoisesti hankitaan sellaisia puutavaradimensioita, joita tarvitsee työstää mahdollisimman vähän työmaalla. Työstöpinnat tulee käsitellä siveltävällä puunsuoja-aineella. B-luokan kyllästys tehdään valmiiksi työstetyille rakenteille ja osille. (RT 21-11287)

Kyllästäminen on puun modifiointimenetelmä, jolla voidaan parantaa muun muassa puun biologista kestävyyttä tai palonkestävyyttä. Puun teollinen kyllästäminen suoritetaan painekyllästykseenä yli- ja alipainetta hyödyntäen, jotta kyllästysaine imeytyisi riittävän syväälle puuaineeseen ja täten suojaisi puuta normaalia pintakäsittelykyllästystä tehokkaammin. Kyllästetyn puun raaka-aineena käytetään lähes yksinomaan mäntyä, sillä kuusen kyllästämisessä on haasteita puuaineen huonon läpäisevyyden takia, ja koivu puolestaan ei sovellu kyllästykseen luontaisesti helposti lahoavana puuaineena (Viitanen 2008). Kyllästetyn puun tyypillisiä käyttökohteita ovat piha- ja ympäristörakentamisen sovellukset, joissa puu altistuu kosteudelle ja/tai maakosketukselle ja joissa rakenteille asetetaan korkeammat turvallisuustasovaatimukset. Kyllästettyä puuta ei sovellu käytettäväksi sisätiloissa eikä rakenteissa, jotka ovat jatkuvassa kosketuksessa talousveden tai elintarvikkeiden kanssa (Kestopuuteollisuus 2011).

Aiemmin kyllästyksessä käytettiin CCA eli kupari-kromi-arseeni -kyllästeitä, mutta EU-asetukseen perustuva Suomen lainsäädäntö kielsi CCA-kyllästeiden käytön vuoden 2006 syksyllä. Tämän takia EU:n alueella siirryttiin käyttämään pelkästään kuparipohjaisia kyllästeitä. Kreosoottiöljyä käytetään kyllästeaineena erittäin vaativissa käyttökohteissa, kuten ratapölkyissä ja linjapylväissä. Kreosootti on tehokas ja myrkyllinen puunsuojakemikaali koostuen sadoista orgaanisista yhdisteistä, joista suuri osa on ympäristölle tai terveydelle vaarallisia. Tästä syystä kreosoottikyllästettyjen tuotteiden käyttö esimerkiksi leikkikentillä, puistoissa, puutarhoissa tai ulkovirkistysalueilla on kielletty. (Tukes 2020a, Tukes 2020b, Tukes 2020c)

Teollisesti kyllästetty puutavara jaetaan kyllästysluokkiin M, A, AB ja B. Tämä luokitus perustuu standardeissa SFS-EN 335-1, SFS-EN 351-1 ja Pohjoismaiden puunsuojausneuvoston asiakirjassa NTR Dokument nr. 1:2017 esitettyyn puunsuoja-aineen tunkeumaan sekä esitettyihin käyttöluokkiin (RT 21-11287). M-, A- ja AB-luokan puutavaran painekyllästämiseen käytetään kreosoottiöljyä tai vesipohjaista kyllästysainetta. A-luokan kyllästetyssä puutavarassa on kyllästeen määrä noin kaksinkertainen AB-luokan puutavaraan verrattuna. B-luokan puutavara kyllästyksessä käytetään tavallisesti öljypohjaisia kyllästeitä. Suomessa puutavaraa kyllästetään NTR-laatustandardin mukaisesti A- ja AB-luokkiin kuparipohjaisia kyllästysaineita käyttäen. A-luokan kyllästettyä puuta voi

käyttää maa-, vesi- ja betonikosketuksessa olevissa rakenteissa, kuten valaisin- ja sähköpylväissä sekä silta- ja laiturirakenteissa, mutta soveltuu myös käytettäväksi turvallisuutta edesauttavissa rakenteissa, kuten portaissa, kaiteissa sekä terassin kantavissa rakenteissa. AB-luokan kyllästetyn puun käyttökohteita ovat maan pinnan yläpuoliset puurakenteet, kuten aidat, pihakalusteet, terassilaudoitukset ja ulkoverhoukset (Kestopuuteollisuus 2011). B-luokkaan kyllästetään muotoon työstettyä puutavaraa, jota käytetään mm. ikkunoissa ja ulko-ovissa. M-luokan puutavaraa Suomen olosuhteissa ei tarvita. (RT 21-11287)

Suomessa kyllästetyn puun kierrätyksestä vastaa Kestopuuteollisuus ry:n omistama Demolite Oy. Kestopuuteollisuus ry:n jäseniä ovat kyllästettyä puuta valmistavat yritykset, kyllästysaineita valmistavat sekä kyllästysaineita maahantuovat yritykset. Kierrätysjärjestelmä käytöstä poistetulle kyllästetylle puulle on luotu Suomeen, jotta vanhoja suoja-aineita, kuten CCA-kyllästeitä, sisältävä puu saadaan kerättyä ja hyödynnettyä turvallisesti käytöstä poistamisen jälkeen. Kyllästettyjen puutuotteiden käyttöikä on tyypillisesti varsin pitkä, jonka vuoksi CCA-kyllästettä sisältävää puuta palautuu yhä kierrätykseen. Tämän vuoksi kaikkea kierrätyspuuta, myös nykyisillä kuparipohjaisilla suoja-aineilla käsiteltyä puuta, käsitellään vaarallisena jätteenä (Kestopuuteollisuus 2021a).

Käytöstä poistettu kyllästetty puu kerätään yhteistyössä kunnallisten jätelaitosten, puutavara- ja rakennustarvikeliikkeiden sekä tuotteen valmistajien kanssa (Kestopuuteollisuus 2021a). Sadoilta eri puolella Suomea sijaitsevilta keräyspisteiltä kyllästetty puu kuljetetaan Demolite Oy:n kierrätystermiinaaliin Tuulokselle, jossa se prosessoidaan energiantuotannon kierrätyspolttoaineeksi, jonka jälkeen haketettu puuainekse toimitetaan Saksaan polttolaitokselle energiantuotannon raaka-aineeksi. Kreosoottikyllästeitä sisältävä hake sen sijaan toimitetaan kotimaiselle voimalaitokselle hyödynnettäväksi (Tähkälä 2015). Poltossa syntyvät savukaasut puhdistetaan ja tuhka käsitellään asianmukaisesti.

2.3 C/D-puun määrät Suomessa

Määrällisesti eniten rakentamista suoritetaan Etelä-Suomen alueella sekä kasvukeskuksissa. Näin ollen rakennus- ja purkupuun määrät ja virrat ovat hyvin erilaisia eri puolilla Suomea. Alueelliset jätehuoltoyritykset ja kierrätyslaitokset toimivat yleisesti vastaanottopisteinä rakennus- ja purkujätteille. Suomessa kertyvän rakennus- ja purkujätteen määrän arviointi on haastavaa johtuen tilastoinnin hajanaisuudesta ja osin myös päällekkäisyyksistä ja puutteista. Häkämies et al. (2019) tekemässä *Puupohjaisen rakennus- ja purkujätteen kiertotalous* -selvityksessä arvioidaan, että Suomessa syntyvän puujätteen määrä on noin 200 000–250 000 tonnia. Tämä laskennallinen lukema on saatu

yhdistelemällä eri toimijoiden tilastotietoja, kirjallisuustietoja, tutkimus- ja haastattelutietoja sekä selvityksen yhteydessä tehtyjä arvioita. Tilastokeskuksen virallisten Suomen jätetilastojen mukaan rakentamisen puujätettä syntyy noin 193 000 tonnia ja vastaavasti Energiateollisuuden tilastoihin perustuvan laskennan mukaan puujätteen määrä olisi 256 000 tonnia. Häkämies et al. selvityksessä todetaan, että Tilastokeskuksen virallisen jätetilaston esittämä määrä puujätteelle on suuruusluokaltaan oikea, mutta siitä puuttuu sekalaisen rakennusjätteen seassa oleva puujäte, koska tästä määrästä ei ole käytettävissä seurantatietoa.

Rakennustoiminnasta syntyvien jätteiden määrät ja laadut vaihtelevat suuresti syntypaikan mukaan. Purkukohteista syntyy määrällisesti eniten jätettä, jopa 200–500 kg/r-m³. Korjausrakentamisen kohteissa syntyvät jätemäärät ovat tyypillisesti 0,5–100 kg/r-m³ kun taas uudisrakentamisessa vastaavasti noin 3–15 kg/r-m³ (Perälä & Nippala 1998). Uudisrakentamisen jätteet sisältävät eniten ”puhtaita” jätteitä eli jätelajeita, jotka eivät ole sekoittuneet muihin materiaaleihin kuten käsittelemättömä puuta, pakkausmuoveja ja -pahveja. Korjaus- ja purkukohteissa jätteet ovat tavanomaisesti jossain määrin kontaminoituneita. Esimerkiksi puurunkoiset ikkunat ja puuovet sisältävät puun ohella erilaisia määriä muita materiaaleja, kuten metalleja, pintakäsittelyaineita, lasia, tiiviste- ja eristemateriaaleja sekä muoveja. Eri materiaalien keskinäinen suhde vaihtelee tuotteittain riippuen erityisesti ikkunan tai oven mitoista ja ominaisuuksista. Hautamäen (2020) selvityksen mukaan MSE-puuikkunan kokonaispainosta lasin osuus noin 60 % ja puun osuus noin 35 %.

Rakentamisesta syntyvien puujätteiden määrät vaihtelevat lisäksi rakennushanketyypeittäin (uudis-, korjaus- ja purkukohteet) ja vielä saman hanketyypin sisällä eri kohteissa huomattavasti riippuen päärakennusmateriaaleista. Rakennus- ja purkujätteiden sisältämä puujäte voidaan karkeasti jakaa käsittelemättömään ja käsiteltyyn puujätteeseen. Käsittelemätön puujäte koostuu esimerkiksi hirsistä, sahatavarasta, kattotuoleista ja käsittelemättömistä laudoista, kun taas käsitelty tai sekalainen puujäte koostuu mm. pintakäsittelyistä laudoista ja levyistä, vaneri-, mdf- ja lastulevyistä sekä liimapuutuotteista.

Teollisuuden tuotantotilastojen mukaan vuonna 2019 Suomessa valmistettuja puurunkoisia ikkunoita myytiin noin 726 000 kpl ja vastaavasti puurunkoisia ovia noin 1 625 700 kpl (Tilastokeskus 2020b). Osa valmistetuista tuotteista menee vientimarkkinoille, mutta vastaavasti ovia ja ikkunoita myös tuodaan Suomeen. Ikkunoiden ja ovien käyttö rakentamisessa jakautuu uudisrakentamiseen ja korjausrakentamiseen. Käytöstä poistetuista ikkunoista ja ovista syntyvää C-puujätettä kertyy vain korjausrakentamisen osalta sekä rakennusten purkamisen yhteydessä. Korjausrakentamisen arvioitu osuus kaikista talonrakennushankkeista on noin 44 % (Tilastokeskus 2019). Korjausrakentamisen määrän oletetaan pysyvän lähivuosina nykyisellä tasolla tai jopa hieman kasvavan asuntojen

ikärakenteesta johtuen, sillä merkittävä osa Suomen rakennuskannasta on rakennettu 1970–1980-luvuilla. Myös purkamisen yleistyy korjausrakentamisen vaihtoehtona (RAKSU 2020).

Rakennus- ja purkujätteen koostumus vaihtelee merkittävästi. Osaltaan tähän vaikuttavat myös käytöstä poistetut ikkunat ja ovet. Esimerkiksi ikkunoissa ikkuna-aukon koko määrittää merkittävästi lasin sekä karmeissa ja puitteissa käytettävän puumateriaalien suhdetta. Lasi muodostaa suurimman osan ikkunan painosta puun ollessa toiseksi suurin. Arviolaskelmien mukaan puurakenteisessa ikkunatuotteessa puun osuus olisi noin 20–25 kg (Hautamäki 2020). Ovituuotteissa myös oven tyyppi vaikuttaa merkittävästi painoon ja sitä kautta materiaalityyppijakaumaan. Rakenteeltaan ja kooltaan massiivisimmissa ulko-ovissa esimerkiksi kehyksen rakenne ja käytettävät eristysmateriaalit poikkeavat huomattavasti kevyempi rakenteisista sisäovista.

Myös ikkuna- tai ovituotteiden iällä on vaikutusta niiden materiaalityyppijakaumaan, sillä viime vuosikymmenien aikana ovien ja ikkunoiden rakenne sekä niissä käytettävät materiaalit ovat muuttuneet ja kehittyneet paljon verrattuna esimerkiksi 40–50 vuotta sitten valmistettuihin vastaaviin tuotteisiin. Oletuksella, että yhden ikkunayksikön keskipaino olisi noin 50–60 kg ja oven 40–50 kg, voidaan ikkunoiden ja ovien tuotantomäärien pohjalta arvioida, että käytöstä poistetuista ikkunoista ja ovista syntyy Suomessa rakennus- ja purkujätettä yhteensä vuosittain noin 40 000–50 000 tn. Ikkunoiden ja ovien teoreettisen materiaalityyppijakauman perusteella olisi täten arvioitavissa, että käytöstä poistetuista ikkuna- ja ovituotteista syntyvän C-luokan puujätteen määrä on noin 15 000–20 000 tn vuodessa. Tämä vastaisi noin 10 %:a rakennus- ja purkupuun vuosittaisesta tilastoidusta kokonaismäärästä Suomessa.

Käytöstä poistetun D-puun eli kyllästetyn puun osalta vuosittaiset määrät ovat selkeämmät, sillä Demolite Oy:n, joka vastaa kyllästetyn puun kierrätyksestä Suomessa, kierrätyslaitoksella prosessoidaan kyllästettyä puuta vuosittain noin 30 000 tonnia. Kyllästetyn puun vuosituotanto Suomessa on noin 100 000 tonnia (342 000 m³), josta viennin osuus on noin 15 %. Tuotanto koostuu sahatavarasta, pylväistä ja ratapölkkyistä. Määrällisesti eniten tuotetaan sahatavaraa, jonka osuus vuosituotannosta on noin 80 % (Kestopuuteollisuus 2021b).

3 Puujätteenkäsittelyn logistiikka, erottelu ja lajittelu

Kyllästetyn puun eli D-puun osalta pyrittiin selvittämään puujätteenkäsittelyn logistiikka, erottelun ja lajittelun teknisiä valmiuksia tuottaa puhdasta ja tasalaatuista raaka-ainetta jatkojalostuksen tarpeisiin. Erilaisin analysointimenetelmin tutkittiin kyllästetyn puun tunnistettavuutta kuparikyllästeisten ja CCA-kyllästeisten puukappaleiden osalta. Lisäksi selvitettiin potentiaalisia teknologisia ratkaisuja, jotka soveltuisivat käytöstä poistetun kyllästetyn puun teolliseen lajitteluun.

3.1 Kyllästetyn puun EDS-mittaukset

Paikallisen jätehuoltoyhtiön vastaanottopisteeltä kerätyistä kyllästetyistä puujätenäytteistä (kuva 1) määritettiin elektronimikroskooppitutkimuksella (SEM-EDS) niiden sisältämiä kyllästeaineita ja niiden määriä. SEM-EDS on ainetta rikkomattoman mittaussuunnitelma, jolla kyetään selvittämään mahdollisten vaarallisten tai haitallisten alkuaineiden määrä tutkittavassa näytteessä alkuaineanalyysointia (EDS) käyttäen.

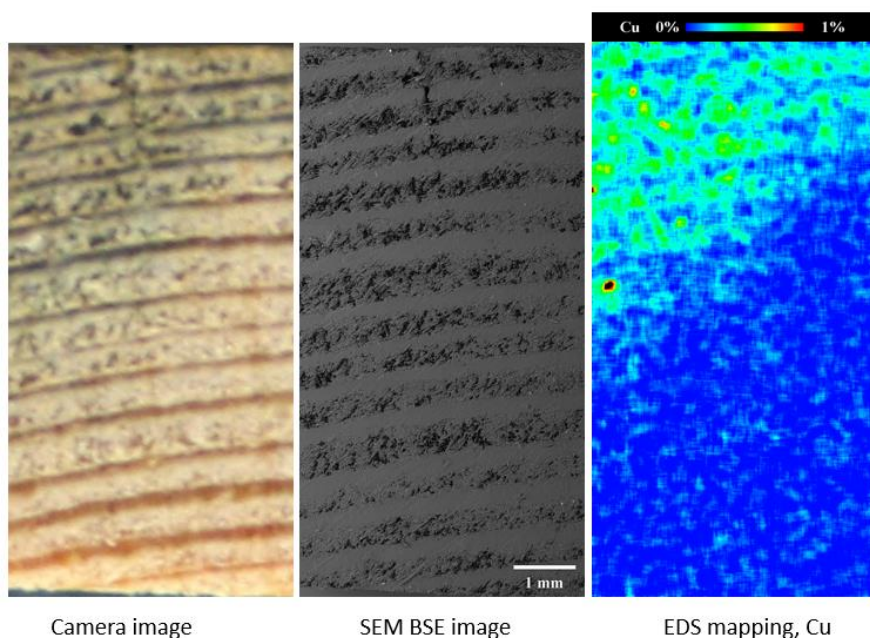


Kuva 1. Kyllästetyt puunäytteet kupari-, kromi- ja arseenipitoisuuksien selvittämiseksi EDS-mittauksilla.

Kyllästeainemäärien arvioinnissa on hyödynnetty Työterveyslaitoksen OVA-ohjetta (Työterveyslaitos 2017), jonka mukaan CCA-kyllästeellä kyllästetyssä männyn pintapuussa on kuparia (Cu) 1,2-1,4 kg/m³, kromia (Cr) 2,1-2,3 kg/m³ ja arseenia (As) 1,8-2,2 kg/m³. Edellä mainittujen määrien ja männyn keskimääräisen tiheyden 450 kg/m³ pohjalta määritettiin CCA-kyllästeaineiden laskennalliset raja-

arvot painoprosentteina, jotka olivat kromille 0,47-0,51 p-%, kuparille 0,31 p-% ja arseenille 0,49 p-%. EDS-mittaus suoritettiin kaikkiaan 41 näytteelle, jotka olivat valittu satunnaisesti kyllästetyn puun vastaanottopisteeltä. Koekappaleet edustivat kymmentä erilaista kyllästetyn puun sahatavaradimensiota. Mittaus suoritettiin kunkin koekappaleen poikkipinnalta pintapuun välittömästä läheisyydestä.

Mittausten pohjalta oli todettavissa, että yhdeksän koekappaletta sisälsi käytöstä poistunutta CCA-kyllästettä ja viisi koekappaletta kupari-kromi-kyllästettä. Suurin osa tutkituista näytteistä eli 27 koekappaletta oli kupari-kyllästettyjä. Mitatut pitoisuudet olivat seuraavat: kupari $0,39 \pm 0,21$ p-%, kromi $0,91 \pm 0,31$ p-% ja arseni $0,83 \pm 0,21$ p-%. Kuparin pitoisuudet tutkituissa koekappaleissa vastasivat melko hyvin edellä mainittuja laskennallisia raja-arvoja, mutta kromin ja arseenin pitoisuudet olivat selvästi raja-arvoja korkeammat. Yksittäisen mittauspisteen käyttö luo jonkin verran epävarmuutta mittaustuloksiin, sillä kyllästeaineen uppoumassa puuainekseen saattaa esiintyä osin merkittäväkin paikallista vaihtelua, kuten kuvasta 2 on havaittavissa. Sinisellä alueella kuparin osuus on lähellä nollaa, kun taas vihreä, keltainen ja punainen väri kyseisessä järjestyksessä kuvaavat korkeampia Cu-pitoisuuksia.



Kuva 2. Kupari-kyllästeen uppouman havainnollistaminen eri värein SEM-EDS-tekniikalla.

3.2 Kyllästetyn puun XRF-mittaukset

Suomessa kyllästetyn puun kierrätyksestä vastaava Demolite Oy suoritti omassa kierrätysterminalissaan kyllästetyn puun kenttälajittelukokeen käsikäyttöisellä XRF-analysaattorilla. Lajittelukokeen tarkoituksena oli kartoittaa eri kyllästysaineilla käsiteltyjen materiaalien osuudet vastaanotetuissa jätepuuerissä. Tutkittu kyllästepuun määrä oli noin 10 m³, kokonaispainon ollessa 1100 kg. Mittaustulosten pohjalta havaittiin, että kuparikyllästettyjen ja CCA-kyllästettyjen jätepuukappaleiden osuus kokonaismäärästä jakautui melko tasaisesti 50-50 suhteessa. Tutkitusta määrästä kuparikyllästettyjen osuus oli noin 530 kg ja vastaavasti CCA-kyllästettyjen osuus noin 570 kg. Tarkemman ja luotettavamman jakauman selvittämiseksi vastaavanlaisia mittauksia tulisi tehdä lisää jatkotutkimuksena ja mahdollisimman laajalla otoksella vastaanotetut jätekuormat huomioiden.

3.3 Kyllästetyn puun lajitteluteknologiat

Käytöstä poistetun kyllästetyn puun teollinen lajittelu edellyttää mahdollisimman automaattista linjastomallista ratkaisua. Tällöin lajittelun tulisi perustua nopeaan, kosketuksettomaan ja mielellään ainetta rikkomattomaan mittausteknologiaan, joka mahdollistaa suurien materiaalivirtojen nopean, tehokkaan ja luotettavan lajittelun online-mittauksena. Käytettävän online-mittausmenetelmän tulee mahdollistaa tarvittavan mittaustiedon saaminen reaaliaikaisesti tai lähes reaaliaikaisesti. Lisäksi lajiteltavien kappaleiden esikäsittelyt tulisi pitää minimissään tai mahdollisuuksien mukaan eliminoida kokonaan pois. Tyypillisiä online-mittausratkaisuja ovat mm. röntgenfluoresenssi- ja laserindusointianalysaattorit, lähi-infrapuna- eli NIR-spektrometrit sekä kannettavat kaasukromatografrit (Ikonen 2016). Näitä anturiteknologioihin perustuvia online-erottimia käytetään nykyään hyvin laajalti kierrätys- ja lajittelulaitoksilla jätejakeiden tunnistamiseen ja lajitteluun.

Näistä kyllästetyn puumateriaalin mittaukseen soveltuvat parhaiten alkuainekoostumusta mittaavat röntgenfluoresenssi (XRF) ja laserindusointi (LIBS) -analysaattorit. Lähi-infrapuna- (NIR) spektrometrit ja kaasukromatografrit soveltuvat ennen kaikkea eri aineiden, materiaalien ja yhdisteiden tunnistamiseen. NIR-tekniikkaa käytetään jätteen lajittelulinjastoissa mm. eri muovilaatujen tunnistamiseen. Kaasukromatografi-teknologiat soveltuvat huonosti kyllästetyn puun lajitteluun, sillä tutkittavien yhdisteiden on oltava joko kaasuja tai riittävän haihtuvia käytettäessä korotettua lämpötilaa.

3.3.1 XRF

XRF (X-ray fluorescence) eli röntgenfluoresenssi on ainetta rikkomaton mittaustekniikka, jolla tutkitaan materiaalin sisältämiä alkuaineita. Teknologia perustuu XRF-säteilyyn, jota syntyy, kun fluoresenssisäteilyä emittoituu näytteestä kiihdytettäessä sitä röntgenlähteellä. Jokaisella alkuaineella on ominainen fluoresenssisäteily, jota on mahdollista käyttää alkuaineen ja sen määrän mittaamisessa tutkittavasta kappaleesta. Mittaus tapahtuu nopeasti, jopa sekunnin kymmenysoissa. XRF-menetelmän käyttöä rajoittava tekijä on sen huono kyky tunnistaa keveitä alkuaineita. Myös näytteiden kosteuspitoisuudella on vaikutusta mittaustarkkuuteen. Korkea kosteuspitoisuus eli suurempi vesimäärä näytteessä absorboi röntgensäteitä heikentäen mittaustarkkuutta. XRF-teknologia soveltuu erinomaisesti online-mittauksiin, sillä menetelmän käyttö ei tyypillisesti vaadi tutkittavan näytteen esikäsittelyä. XRF-analysaattorin toimintaperiaate pohjautuu röntgensäteilyyn, joten käyttöturvallisuuteen mittaustilanteessa tulee huomioida säteilyturvakeskuksen (STUK) ohjeistuksien mukaisesti (Laine-Ylijoki et al. 2003, Ikonen 2016, Siuvatti 2017).

3.3.2 LIBS

LIBS (Laser induced breakdown spectroscopy) eli laserindusointianalysaattoria voidaan XRF:n tavoin käyttää alkuainepitoisuuksien määrittämiseen. Menetelmä perustuu atomispektrometriaan. Mittauksessa korkeaenerginen laserpulssi ohjataan haluttuun kohtaan tutkittavaa näytettä, jolloin pulssimainen laser sulattaa materiaalin pintaa muodostaen plasmaa, joka emittoi jäähtyessään kyseiselle alkuaineelle ominaisia aallonpituuksia. Emittoituneesta spektristä voidaan määrittää kyseisen näytteen alkuainekoostumus. LIBS ei ole täysin ainetta rikkomaton menetelmä, sillä mittaus jättää tutkittavan näytteen pintaan pienen, muutama millimetrin pituisen polttojäljen. Mittaus tapahtuu tyypillisesti muutamissa sekunneissa. LIBS on käyttöturvallisempi kuin XRF, koska sen toiminta ei perustu röntgensäteilyn hyödyntämiseen. LIBS-menetelmällä voidaan analysoida myös keveitä alkuaineita, joita XRF ei kykene tunnistamaan (Ikonen 2016).

3.3.3 NIR

Lähi-infrapunaspektrometri eli NIRS (Near infrared spectroscopy) on optinen erotusmenetelmä, jolla voidaan selvittää molekyylien rakenteita lähes mistä tahansa aineesta. NIRS perustuu orgaanisten yhdisteiden tunnistamiseen infrapuna-absorption perusteella, joita verrataan tunnistuskirjaston sisältämiin spektreihin eri materiaaleille. NIRS on ainetta rikkomaton analyysimenetelmä, joka kykenee tunnistamaan materiaaleja nopeasti. Menetelmää käytetään hyvin laajalti moderneissa jätteiden lajittelulinjastoissa esimerkiksi eri muovilaatujen tunnistamisen. Käytettäessä NIRS-teknikka

on kappaleiden oikeanlainen käsittely hyvin olennaista, sillä sironta, hajavallo tai näytteen väärä asettelu voivat aiheuttaa spektriin mittausvirhettä ja täten antaa virheellisen tuloksen. Jos kappale sisältää tunnistettavaa alkuainetta vain hyvin pieniä määriä, voidaan NIRS-mittauksen määritystarkkuutta parantaa kappaleiden esikäsittelyllä. Erityisesti alkuaineanalyyseissä tunnistettavien kappaleiden sisältämän kosteuspitoisuuden vähentäminen kuivaamalla voi olla tarpeellista, koska vesi absorboi NIR-säteilyä (Ikonen 2016, Kamppuri et al. 2019).

3.3.4 Teollinen lajittelu

Käytöstä poistetun kyllästetyn puun eli luokkaan D kuuluvat puujätteen lajittelussa pyrkimyksenä olisi erotella nopeasti ja luotettavasti nykyaikaisia kuparikyllästeitä sisältävät puukappaleet CCA-kyllästeillä kyllästetyistä puukappaleista. Teollisessa lajittelussa olennaista on lajittelutarkkuuden ohella lajittelun nopeus ja korkea automaatioaste. Tämä on mahdollista lajittelulinjastoratkaisussa, jossa mittaus suoritetaan online-mittauksena suoraan esimerkiksi kuljetushihnalta. Manuaalinen lajittelu käsikäyttöisiä mittalaitteita käyttäen tulee kyseeseen ainoastaan linjastolajittelun kontrollimenetelmänä tai pienten erien lajittelussa. Online-menetelmät, kuten XRF ja LIBS, tarjoavat teknologisen mahdollisuuden analysoida tutkittavan näytteen sisältämiä alkuaineita ja niiden määriä. XRF-analysaattorilla voidaan selvittää jätteiden haitta-ainepitoisuuksia aina natriumista uraaniin asti, mutta sillä ei kuitenkaan pystytä analysoimaan hyvin kevyitä alkuaineita kuten hiiltä tai vetyä (Ikonen 2016). Näin ollen puun kyllästyksessä nykyisin käytettävät sekä aiemmin käytetyt alkuaineet eli kupari, kromi ja arseeni ovat luotettavasti tunnistettavissa XRF-analysaattorilla. XRF- ja LIBS-analysaattorit mittaavat vain näytteenpinnan, mikä voi olla ongelmallista, mikäli pinnan alapuolella olevan materiaalin ominaisuudet eroavat päällä olevasta materiaalista. Kyllästetyn puun mittauksessa tätä ongelmaa ei todennäköisimmin ilmene, ellei mitattava puukappale ole rikkoontunut tai haljennut siten, että mittauspiste osuu kyllästämättömälle osalle puuta.

Huolimatta useista potentiaalisista teknologioista kyllästetyn puun teolliselle lajittelulle haasteita asettavat osin teknologiset rajoitteet, kuten mittausnopeus, puukappaleiden dimensiot ja kosteuspitoisuuden vaihtelut sekä mahdolliset kontaminaatiot tunnistettavien kappaleiden pinnalla. Jotta CCA- ja kuparikyllästeitä sisältävät puukappaleet saataisiin mahdollisimman vaivattomasti ja luotettavasti eroteltua toisistaan niiden ei tulisi olla kiinnittyneinä toisiinsa, ts. ei mekaanista kiinnitystä, kuten ruuvi- tai naulaliitoksia, eri kyllästeaineita sisältävien kappaleiden välillä. Myös partikkelikoon pitäisi mahdollistaa nopea ja luotettava lajittelu. Tyypillisesti erilaisissa puujätteen lajittelulinjastoratkaisussa käytetään murskausta esikäsittelymenetelmänä. Murskauksella pyritään irrottamaan puujätteestä mahdolliset muut materiaalit, kuten ruuvit, naulat ja muut ei-toivotut

partikkelit sekä pienentämään materiaalin partikkelikoko sellaiseksi, että jakeiden käsittely lajittelulinjastolla olisi helpompaa. Linjastolajittelussa pienet ja kevyet kappaleet voidaan ohjata omiin lajittelulokeroihinsa esimerkiksi ilmaerottimella, kun taas suurten ja painavien kappaleiden liikutteluun tarvitaan tyypillisesti mekaaninen erotin, kuten ohjain, työnnin tai kappaleen käsittelyrobotti.

Lajittelun kannalta sopivan partikkelikoon valinta on aina kompromissi lajittelutehokkuuden ja materiaaliupuhtauden välillä. Kyllästetyn puun linjastolajittelussa liian pieni palakoko (esimerkiksi 5-10 mm) aiheuttanee haasteita eri kyllästeaineita sisältävien erotteluun kappaleiden tunnistettavuuden vaikeutuessa. Tehokkaamman tunnistamisen kannalta alkuperäisen kappalekoon säilyttäminen tai murskeen erittäin suuri palakoko, esimerkiksi yli 50 mm, lisäävät merkittävästi lajiteltavien kappaleiden tunnistettavuutta ja sitä kautta myös sen tehokkuutta, mutta tällöin lajiteltavat kappaleet saattavat sisältää erilaisia määriä muita materiaaleja, kuten metalleja tai muoveja.

XRF ja LIBS-teknologioiden soveltuvuudesta kyllästetyn puun lajitteluun on tutkittu mm. Hasan et al. (2011a) taholta. He selvittivät tutkimuksessaan XRF- ja LIBS-tekniikoiden soveltuvuutta kyllästetyn puun lajitteluun ja havaitsivat, että XRF:n lajittelutehokkuus oli LIBS-tekniikkaa parempi. Erityisesti arseenin tunnistamisessa oli haasteita LIBS-tekniikkaa käytettäessä. Tutkimuksessa todettiin XRF-tekniikan soveltuvan kustannustehokkaaseen lajitteluun lajittelulaitoksissa, joissa pyritään erottamaan arseenipohjaiset puujätteet muusta puujätevirrasta. Hasan et al. (2011b) tutkivat myös XRF-tekniikan lajittelutehokkuutta kyllästettyä ja käsittelemätön puuta sisältävän puujätteen lajittelussa, ja havaitsivat, että lajittelutehokkuus parani kappaleiden lukumäärän ja painon perusteella. Tutkimuksessa saavutettiin noin 75-90 % erotustarkkuus kyllästetylle puulle ja noin 70-95 % tarkkuus käsittelemättömälle puulle. Tutkimuksessa havaittiin myös, että metallipitoisuudella oli vaikutusta lajittelutarkkuuteen siten, että korkeampi metallipitoisuus lisäsi tarkkuutta.

Kuvantamistekniikoiden kehittyminen on parantanut pienikokoisten partikkeleiden lajittelua suurilla nopeuksilla huomattavasti. Pigorsch et al. (2014) tutkivat NIR-kuvantamistekniikan lajittelutehokkuutta luokkien A, B ja C puujätteelle, ja havaitsivat, että menetelmä kykeni tunnistamaan partikkelikokoja 10-50 mm olevia puujätekappaleita 2 m/s linjanopeudella. Tutkimustulostensa pohjalta he ennakoivat, että tulevaisuudessa NIRS saattaisi olla tehokkain ja taloudellisin tapa puujätteen lajitteluun, mutta myös rinnakkaisen teknologian, kuten XRF:n tai LIBS:n, käyttö lienee välttämätöntä epäorgaanisten aineiden kuten raskasmetallien tunnistamiseksi. Myös Mancini & Rinnan (2021) tutkimuksessa todettiin NIRS:n olevan varsin lupaava työkalu jätepuun tunnistamiseen ja analysointiin.

Suunniteltaessa teollista lajittelulinjastoa käytöstä poistetun puun eri luokkiin kuuluville puujätteille, kuten kyllästetty puu, käsittelemätön puu ja muilla tavoin käsitelty puu, lajittelutehokkuuden ja -tarkkuuden kannalta lienee järkevintä hyödyntää useampia eri analyysiteknologioita. Näin saavutettaneen paras lopputulos, joka mahdollistaa puujätteiden nopean ja tehokkaan erottelun teollisissa lajittelulaitosratkaisuisissa. Myös mahdollisilla esikäsittelyillä, kuten jätteiden murskauksella tunnistuksen ja käsittelyn kannalta sopivampaan partikkelikokoon, voidaan tehostaa lajittelutarkkuutta ja lisätä kapasiteettia käytettävien teknologioiden sallimissa rajoissa.

4 Rakennustuotteissa käytetyt aineet

Suomessa puu on yksi merkittävimmistä rakennusmateriaaleista, jota on käytetty vuosisatoja rakentamisessa erittäin monipuolisesti kantavista rakenteista terassilautoihin. Rakennusmateriaalina puu joutuu usein kovalle rasitukselle. Erityisesti ulkotiloissa puu altistuu jatkuvalle kosteuskuormitukselle, joka vaikuttaa ajan saatossa puun ominaisuuksiin negatiivisesti. Kosteuspitoisuuden kasvaessa biologisten tekijöiden (home-, laho- ja sinistäjäsiienet sekä hyönteiset) aiheuttamat vauriot lisääntyvät. Muun muassa näistä syistä puussa käytetään erilaisia kemiallisia suoja-aineita, kuten kyllästysaineita, maaleja ja muita pintakäsittelyaineita, joiden avulla puun käyttöikä saadaan pidennettyä moninkertaisesti käsittelemättömään puuhun verrattuna. Lisäksi kemiallisilla aineilla voidaan muokata puun muotoja ja parantaa sen ominaisuuksia. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi palo- ja UV-suoja-aineet sekä liimat. Erityisesti aiemmin käytetyt aineet saattavat kuitenkin sisältää ihmisen terveydelle ja/tai ympäristölle haitallisia aineita, jonka takia puun sisältämien aineiden tutkiminen ja niiden haitallisuuden määrittely on tärkeää. Tällä tavoin varmistetaan puun turvallinen käsittely purkukohteessa ja purkupuulle valitaan sille sopiva sekä turvallinen käyttökohde.

4.1 Rakennus- ja purkupuumateriaalissa esiintyvät nykyisin säädellyt ja haitalliset aineet

Kirjallisuusselvityksen perusteella listattiin taulukkoon 1 olennaisimmat aineet, joita voi esiintyä purkupuussa. Taulukossa esitellään myös esimerkkikäyttökohteita sekä kuvaus haitallisuudesta.

Taulukko 1. Rakennus- ja purkupuumateriaalissa esiintyviä nykyisin säädeltyjä ja haitallisia aineita (Seppälä 2020).

Haitalliset aineet	Esiintyvyys	Esimerkki-käyttökohteita	Haitallisuus	Muuta huomioitavaa
Kreosotti	Puun kylläste	Rautatiepalkit, silta- ja satamarakenteet.	Pitkäaikainen altistuminen lisää syöpäriskiä. Käsittely saattaa aiheuttaa hengitysteiden, ihon ja silmien ärsytystä. Erittäin myrkyllistä vesieliöille.	Puun käsittelyssä tulee käyttää käsi- ja silmänsuojaimia. Työstäessä myös hengityssuojainta. Vuoden 2009 jälkeen vain ammattikäytössä.
Arseeni	CCA-puukylläste	Sähkötolpat, julkisten ja teollisuusrakennusten puurakenteet.	Arseenipöly voi lisätä keuhkosyövän riskiä. Voi imeytyä myös ihon läpi. Erittäin myrkyllistä vesieliöille.	Käsittelyssä tulee käyttää käsinsuojaimia. Työstäessä myös silmä- ja hengityssuojaimia. 2004 jälkeen vain ammattikäyttöön. Ei käytettäväksi asuinrakennuksissa tai pihapiirissä.
Kupari	CCA-puukylläste	AB-luokka: terassit, piharakenteet. A-luokka: maa- ja vesikosketuksissa olevat puurakenteet (sähköpylväät, rautatiepalkit, siltarakenteet).	Pölynä voi ärsyttää silmiä ja ihoa. Erittäin myrkyllistä vesieliöille.	Ainoa kuluttajakäyttöön luovutettu CCA-kyllästeen tehoaine.
Lyijy	Maalin väripigmentit.	Maalilla käsitelty puu ulkorakenteissa.	Pöly voi aiheuttaa kroonisen lyijymyrkytyksen.	Kielletty sisätiloissa 1920-luvulla. Ulkotiloissa käyttö loppunut 60-70-luvulla.
PCB-yhdisteet	Vanhat puulattiamaalit.	Vanhat puulattiat.	Ympäristölle erittäin haitallista. Kertyy ravintoketjussa kalojen kautta myös ihmiseen.	Käyttö ja valmistus kielletty Suomessa 1990.
Formaldehydi	Puuliimat	MDF- ja HDF-paneelit. Lastulevyt ja vanerit.	Sisäilmassa puusta haihtuva formaldehydi voi aiheuttaa hengitysteiden ja silmien ärsytystä.	Formaldehydin määrää sisäilmassa voi yrittää vähentää tehostamalla ilmanvaihtoa tai tuuletamalla.
Kloorifenoli	Sinistymisenesto aineet	Painekyllästetyt katto- ja runkorakenteet, ikkunakehykset.	Kloorifenolin haju tarttuu tekstiileihin, puurakenteisiin, ihoon yms. Hyvin liukeneva aine, joka voi saastuttaa pohjavesiä.	Käyttö kielletty kokonaan vuonna 2000.
Mikrobi-vaurioinen puu	Kosteudelle altistunut puu (kosteus < 20%). Yleistä käsittelemättömässä puussa.	-	Homeititöt voivat sisäilmassa aiheuttaa erilaisia hengitystieoireita.	Lahottajasienet heikentävät puun lujuutta. Sinistäjäsenet ja home aiheuttavat värimuutoksia.

4.2 Arseenia sisältävän CCA-kyllästetyn puun uudelleenkäyttö

Kyllästetty puu on mahdollista käyttää uudelleen vain, jos se ei vaadi muuntamistoimia, kuten sahausta tai hiontaa. Uudelleenkäytössä tulee kuitenkin huomioida arseenia sisältävän puun käyttörajoitukset ja vaatimukset (vain ammatti- ja teollisuuskäyttöön, ei käytettäväksi pihapiireissä yms.). Jos puu vaatii ennen uudelleenkäyttöä muokkausta, kuten lahojen osien, eristeiden tai kiinnikkeiden poistamista, niin se tulee tehdä ympäristösuojelulain mukaisen ympäristöluvan omaavalla jätehuoltolaitoksella. Jos käyttökelvottomia osia ei poisteta, niin luokitellaan puu vaaralliseksi jätteeksi. Arseenia sisältävää CCA-kyllästettyä puuta voidaan luovuttaa uudelleenkäytettäväksi vain näihin käyttökohteisiin:

1. julkisten rakennusten, maatalous- ja toimistorakennusten sekä teollisuustilojen kantavat puurakenteet
2. sillat ja siltarakenteet
3. makean tai murtoveden kanssa kosketuksiin joutuvat puiset rakenneosat, esimerkiksi laiturit ja sillat
4. meluaidat
5. lumivyörysuojat
6. liikenneväylien aidat, liikenteen ohjaus- ja törmäysturvalaitteet
7. karja-aitauksessa käytettävät kuoritut havupuupylväät
8. perustukset ja maan tukirakenteet
9. voimansiirto-, televiestintä- ja valaisinpylväät
10. maanalaisten raiteiden ratapölkkyt. (Tukes 2018.)

4.3 Kierrätyspuun käyttöä ohjaava lainsäädäntö ja säännökset

Purku- ja rakennuspuun hyödyntämistä ohjaa erilaiset kansalliset ja kansainväliset lait ja säännökset, jotka esitellään tässä kappaleessa lyhyesti.

Jätelain (646/2011) tarkoituksena on ehkäistä jätteistä ja jätehuollosta aiheutuvaa vaaraa ja haittaa terveydelle ja ympäristölle sekä vähentää jätteen määrää ja haitallisuutta, edistää luonnonvarojen kestäväää käyttöä, varmistaa toimiva jätehuolto ja ehkäistä roskaantumista (Jätelaki 646/2011, 1 §). Jätelain (646/2011) 2 luvun 8 §:n mukaan kaikessa toiminnassa tulee noudattaa etusijajärjestystä, jonka ensisijainen velvoite on vähentää jätteen syntyä ja sen haitallisuutta. Jos jätettä kuitenkin syntyy, on jätteen haltijan ensisijaisesti valmistettava jäte uudelleenkäyttöä varten. Toissijainen käyttökohde on kierrätys. Jos kierrätysmahdollisuutta ei ole, täytyy haltijan hyödyntää jäte esimerkiksi

energiantuotannossa. Jos tämäkään ei ole mahdollista, tulee jäte loppusijoittaa kaatopaikalle tai poltettavaksi ilman energian talteenottoa. (Jätelaki 646/2011, 8 §.)

Ympäristönsuojelulakia 527/2014 sovelletaan toiminnoissa, joista aiheutuu tai saattaa aiheutua ympäristön pilaantumista, kuten purkuhankkeet. Vaarallisen jätteen uusiokäyttöön tarvitaan viranomaisen myöntämä ympäristönsuojelulain mukainen ympäristölupa, jossa täytyy käydä ilmi mm. vaarallisen jätteen uudelleenkäyttökohde. (Ympäristönsuojelulaki 527/2014, 1 §.)

Maankäyttö- ja rakennuslailla 132/1999 säädetään mm. rakennusten purkulupamenettelyä (Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999, 127 §). Lisäksi lain 154 §:n mukaan rakennuksen purussa tulee huolehtia rakennusjätteen oikeanlaisesta käsittelystä sekä luoda edellytykset käyttökelpoisten rakennusmateriaalien uudelleenkäyttöön (Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999, 154 §).

Valtioneuvoston asetuksella rakennustyön turvallisuudesta VNa 205/2009 määritellään esimerkiksi, että puretut rakenneosat tulee siirtää turvallisesti ja pölyävät aineet tulee kapseloida, jotta niistä ei aiheudu haittaa työntekijän terveydelle (Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta 205/2009, 49 §).

REACH-asetus (EY) N:o 1907/2006 on EU:n asetus, jolla säädetään kemikaalien rekisteröintiä, arviointia, lupamenettelyä sekä rajoittamista. Rajoittamisen lisäksi asetuksella on myös kielletty useiden kemikaalien käyttö. Asetus koskee kaikkia EU:n alueella tuotettuja tai EU:n alueelle tuotuja kemiallisia aineita sellaisinaan sekä seoksissa ja esineistä tarkoituksella vapautuvia aineita. (ECHA 2020b.)

CLP-asetus (EY) N:o 1272/2008 on EU:n asetus, jolla säädellään aineiden ja seosten luokittelua, merkintöjä ja pakkaamista. Asetuksen tarkoitus on määrittää aineiden ja seosten ominaisuuksien perusteella aineen vaarallisuus ihmiselle ja ympäristölle. Vastuu aineen vaarallisuuden selvittämisestä kuuluu aineen valmistajalle, maahantuojalle ja jatkokäyttäjille. Vaaralliseksi luokitelluissa aineissa tulee olla aineen ominaisuuksien perusteella valitut varoitusmerkinnät sekä turva- ja vaaralausekkeet. (ECHA 2020a.)

Green deal -sopimus on helmikuussa 2020 allekirjoitettu Ympäristöministeriön ja kiinteistöalan yhteistyöjärjestö Rakli Ry:n kestävän purkamisen sopimus, jonka tavoitteena on lisätä materiaalitehokkuutta rakennusten purkamisessa. Kiinteistöomistajia ja rakennuttajia kannustetaan tekemään vapaaehtoinen purkukartoitus, jossa kartoitetaan purettavan rakennuksen sisältämät materiaalit sekä niiden mahdolliset haitta-aineet. Tämän tarkoituksena on helpottaa purkumateriaalien hyödyntämistä uudelleenkäytössä sekä pienentää materiaalien ympäristö- ja terveysriskejä. (Ympäristöministeriö 2020, 1–3.)

5 Tuotteiden koevalmistus ja pilotointi

Hankkeessa tutkittiin C/D-kierrätyspuun ominaisuuksia ja niiden parantamista sellaisten lisäaineiden avulla, joilla sekalaista rakennuspuuta voidaan palauttaa takaisin teolliseen kiertoon resurssitehokkaasti ja vähähiilisesti. Tavoitteena oli myös tuoda esiin uudenlainen lähestymistapa rakennuspuun (C/D) uusiokäyttöön ja hyödyntämiseen, joka ei perustu vain energiahyötykäyttöön. Pilotoinnin ja tutkimuksen tavoitteena oli saada tietoa optimaalisista lisäaineista, sekoituksista ja annostuksista resurssitehokasta hyödyntämistä varten. Pilotoinnilla tutkittiin C- ja D-puun käytettävyyttä ja materiaaliominaisuuksia sekä komposiittituotteissa ja -rakenteissa että massiivipuutuotteissa ja -rakenteissa. Valmistettavien tuotteiden tuoteturvallisuuteen liittyvät asiat, kuten lujuusominaisuudet, emissiot ja liukoisuudet, huomioiden.

5.1 Komposiittituotteet ja -rakenteet

Kierrätyspuumurskeen soveltuvuutta ja tuoteturvallisuutta betonikomposiittituotteissa tutkittiin valmistamalla koekappaleita materiaaliominaisuuksien määrittämiseksi. Koevalmistuksessa käytettiin joko C- tai D-puumursketta, mutta ei niiden sekoitusta, koska niiden osalta kierrätysvirrat ovat valmiiksi toisistaan erotetut. Puumurskeena käytettiin kahta eri partikkelikokoa, joista hienojakoisempi (S) oli kooltaan alle 4 mm ja karkeampi (U) 10-20 mm (kuva 3). Puumurskeen ohella koekappaleiden valmistuksessa käytettiin sementtilaastia S30 sekä betonin valmistuksessa tyyppillisesti käytettäviä lisäaineita, joita olivat Ecofax (Eco), masuunikuonajauhe (Mas), aluminaattisementti (Alu) ja Surfactant (Sur). Ecofax on hienojakoinen pulverimainen betonin ja laastin seosaine, joka on prosessoitu kivihiilen poltossa syntyvästä lentotuhkasta. Sitä käytetään sementtipohjaisten tuotteiden seosaineen lisäämään notkeutta ja lujuutta. Masuunikuona on raudan valmistuksessa syntyvää sivutuotetta, joka koostuu kalsiumin ja magnesiumin silikaateista ja aluminosilikaateista. Masuunikuonaa käytetään betonissa seosaineena mm. lujuuden ja sulfaatinkestävyyden parantamiseksi. Aluminaattisementti on kalkki-, alumiinioksidi- ja rautaoksidipohjainen hydraulinen sideaine, jolla on nopea lujuuskehitys, hyvä lämmön- ja sulfaatinkestävyys sekä kemiallinen ja bakteriologinen kestävyys. Surfactant puolestaan on pinta-aktiivinen lisäaine eli huokostin, joka alentaa veden pintajännitystä. Betonissa huokostimia käytetään parantamaan pakkasen kestävyyttä ja vähentämään vedentarvetta valmistuksessa.



Kuva 3. Koekappaleissa käytetty puumurske; S: palakoko alle 4 mm, ja U: palakoko alle 10/20 mm.

Kaikki koekappaleet sisälsivät 5 p-% joko C- tai D-puumursketta. Lisäaineistetuissa koekappaleissa käytettiin puumurskeena alle 4 mm partikkelikokoa (S) olevaa mursketta. Käytetty lisäaine vaikutti koekappaleiden sisältämän sementtilaastin määrään. Sementin osuus vaihteli välillä 15-93 p-%. Tutkimuksessa käytetyt lisäainemäärät olivat seuraavat: Ecofax 5 p-%, Masuunikuona 80 p-%, Aluminaattisementti 5 p-% ja Surfactant 2 p-%. Valmistuksen jälkeen koekappaleita säilytettiin vedessä 28 vuorokauden ajan standardin SFS-EN 12390-2 mukaisesti. Referenssinä käytettiin pelkästään puumursketta ja sementtilaastia sisältäviä koekuutioita. Valmistettujen koekappaleiden koostumukset on esitetty taulukossa 2. Jokaisesta seoksesta valmistettiin standardin mukaisia koekuutioita mekaanisia testejä varten ja laattamaisia koekappaleita emissio- ja liukoisuustestejä varten.

Taulukko 2. Valmistettujen komposiittikappaleiden materiaalikoostumukset.

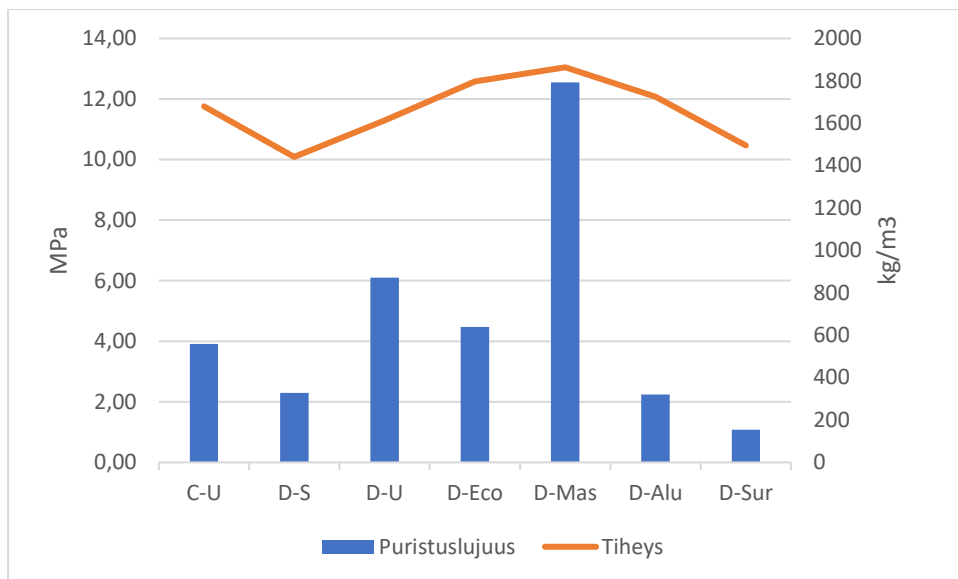
Koekappale	Puumurske [p-%]	Sementtilaasti [p-%]	Lisäaine [p-%]
C-U	5	95	-
D-S	5	95	-
D-U	5	95	-
D-Eco	5	90	5
D-Mas	5	15	80
D-Alu	5	90	5
D-Sur	5	93	2

5.1.1 Puristuslujuus

Koekappaleiden puristuslujuus määritettiin standardin SFS-EN 12390-3 *Kovettuneen betonin testaus*. Osa 3: koekappaleiden puristuslujuus mukaan lujuusluokalle K30 käyttäen kuormitusnopeutta 6,8 kN/s. Standardin mukaiset koekappaleet, jotka on esitetty kuvassa 4, olivat kooltaan 150 mm x 150 mm x 150 mm kuutioita, ja valmistuksen jälkeen niitä säilytettiin vedessä 28 vrk standardin SFS-EN 12390-2 mukaisesti. Pelkästään D-puumursketta sisältänyttä koekuutiota (D-S) käytettiin referenssikappaleena lisäaineistuksen vaikutuksen selvittämiseksi. Karkeampaa, 10-20 mm (U) puumursketta sisältäneitä koekappaleita, C-U ja D-U, käytettiin referenssinä koekappaleelle D-S. Tutkittuja lisäaineita olivat Ecofax (D-Eco), masuunikuona (D-Mas), aluminaattisementti (D-Alu) ja Surfactant (D-Sur). Puristuslujuustestien tulokset sekä koekappaleiden mitatut tiheydet on esitetty kuvassa 5. Kuten tuloksista on havaittavissa, tutkituista lisäaineista ainoastaan masuunikuona paransi merkittävästi puristuslujuutta jäaden kuitenkin yhä merkittävästi K30-lujuusluokan betonin puristuslujuudesta 30 MPa. Surfactant-lisäaineen käyttö puolestaan heikensi kyseisen koekappaleen puristuslujuutta referenssikappaleeseen D-S verrattuna. Kaikki tutkitut lisäaineet lisäsivät koekuutioiden tiheyttä referenssikappaleeseen verrattuna. Mittaustuloksista käy myös ilmi, että karkeampaa U-partikkelikokoa sisältäneiden koekappaleiden (C-U ja D-U) puristuslujuus oli hieman korkeampi verrattuna hienompaa S-partikkelikokoa sisältäneeseen koekappaleeseen (D-S). Pidempi puukuitu toimii tehokkaampana lujitteena sementtimatriisille. Negatiivinen tekijä karkeamman partikkelikoon käytössä oli sen vaikutus koekappaleiden pinnanlaatuun ja siten myös ulkonäköön.



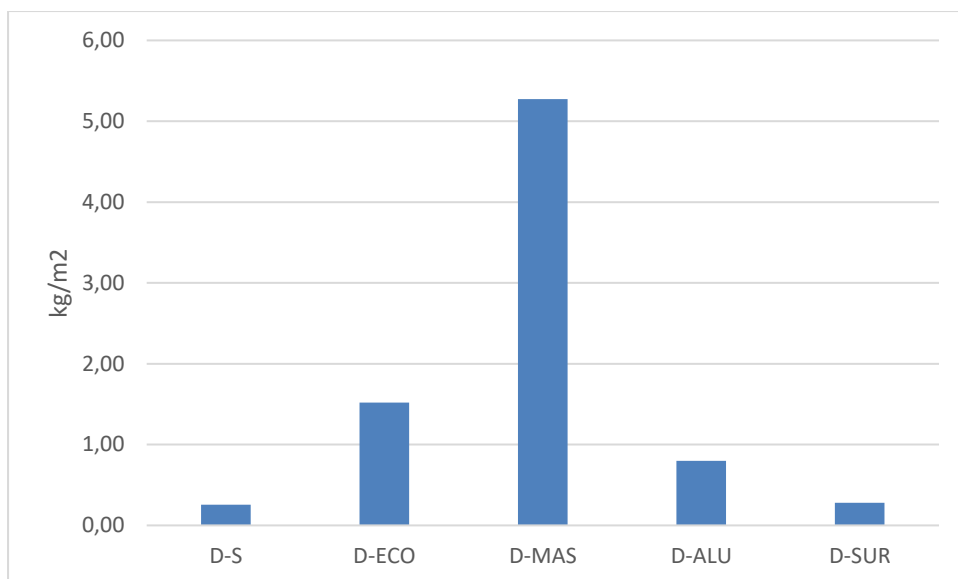
Kuva 4. Kierrätyspuuta sisältäviä koekuutioita puristuslujuuden määrittämiseksi.



Kuva 5. Koekappaleiden puristuslujuudet ja tiheydet.

5.1.2 Säänkestävyys

Koekappaleiden säänkestävyyttä tutkittiin suolapakkaskokeilla standardia SFS-EN 1338 mukaillen. Tutkitut koekappaleet sisälsivät 5 p-% D-puumursketta sekä betonin valmistuksessa tyypillisesti käytettäviä lisäaineita. Referenssinä käytettiin lisäaineistamatonta koekappaletta eli pelkästään 5 p-% D-puuta sisältänyttä kappaletta. Testattava pinta-ala oli kussakin koekappaleessa noin 8 000 mm², ja siihen lisättiin 5 mm ± 2 mm paksuinen kerros talousvesiliuosta, johon oli liuotettu 3 % natriumkloridia (NaCl). Koekappaleita jäädytettiin ja sulatettiin yhteensä 28 syklin ajan, jonka jälkeen jokaisen koekappaleen testattavalta pinnalta irronnut materiaali kerättiin talteen, huuhdeltiin ja kuivattiin uunissa 24 h:n ajan 105 °C ± 5 °C:een lämpötilassa. Irronneen materiaalin kuivamassa punnittiin massahävikin määrittämiseksi. Standardin mukainen kriteeri säänkestävyydelle on, ettei kolmen koekappaleen tuloksen keskiarvon saa olla enintään 1,0 kg/m² eikä mikään yksittäinen tulos saa olla suurempi kuin 1,5 kg/m². Kuten kuvasta 6 on havaittavissa, referenssikappaleen ja Surfactant-lisäainetta sisältäneen koekappaleen massahävikit olivat alhaisimmat tutkituista näytteistä. Aluminaattisementtiä sisältänyt koekappale jäi selvästi alle yksittäiselle koekappaleelle asetetun raja-arvon 1,5 kg/m², kun taas Ecofax-lisäainetta sisältänyt koekappale ylitti niukasti kyseisen raja-arvon. Masuunikuonaa sisältäneellä koekappaleella ilmeni tutkituista koekappaleista selvästi suurin massahävikki ylittäen moninkertaisesti yksittäiskappaleelle asetetun raja-arvon.



Kuva 6. Koekappaleiden massahävikki.

5.1.3 Emissiot

Koekappaleesta D-S valmistetun testikappaleen avulla selvitettiin siitä haihtuvia VOC- ja ammoniakkiemissioita. Testaus suoritettiin Rakennustietosäätiön (RTS) laatimaa M1-testausprotokollaa mukaillen. Mittauksissa määritettiin haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (volatile organic compounds, VOC) ja ammoniakin osalta laskennalliset arvot tolueenivasteen avulla pintaemissionopeudelle (SER) ja mallihuonepitoisuudelle. Mallihuonepitoisuus määritettiin käyttäen eurooppalaista 30 m³ mallihuonetta, jossa testatun tuotteen laskennallinen pinta-ala on 12 m².

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaisemissio (TVOC) oli 0,037 mg/(m²h) ja mallihuonepitoisuus 30 µg/m³. Vastaavasti ammoniakin SER oli 0,020 mg/(m²h) ja mallihuonepitoisuus 16 µg/m³. Yksittäisistä VOC-yhdisteistä 1-Metoksi-2-propanolin (propyleeniglykolimonometyylietteri), 2-Heptanonin ja α-Pineenin osalta mallihuonepitoisuus oli alle 5 µg/m³, joten niiden pitoisuuksia ei huomioitu TVOC-arvossa. Kokonaisemissio (TVOC) muodostui näin ollen ainoastaan bentsaldehydin sekä alifaattisten ja aromaattisten hiilivetyjen seoksen emissioista. Yksittäisten VOC-yhdisteiden yhdistekohtaisilla vasteilla lasketut mallihuonepitoisuudet jäivät selvästi alle EU-LCI raja-arvojen. Lasketut VOC-yhdisteiden mallihuonepitoisuudet olivat kaikkien muiden paitsi 1-Metoksi-2-propanolin eli propyleeniglykolimonometyylietterin osalta alle 5 µg/m³. 1-Metoksi-2-propanolin mallihuonepitoisuus oli 7 µg/m³. Yksittäisten VOC-yhdisteiden EU-LCI raja-arvot vaihtelevat välillä 400–7900 µg/m³.

5.1.4 Liukoisuus

Kyllästettyä puuta sisältäneen koekappaleen (D-S) liukoisuutta tutkittiin standardin CEN/TS 16637-2: *Construction products. Assessment of release of dangerous substances. Part 2: Horizontal dynamic surface leaching test* mukaisella liukoisuustestillä. Tutkimuksessa referenssinä pelkkää uuttoliuosta eli deionisoitua vettä. Mittaukset suoritettiin kahden eri mittaussyklin, 6 tuntia ja 18 tuntia, jälkeen. Mittaustulokset on esitetty kootusti kuparin, kromin ja arseenin osalta taulukossa 3.

Taulukko 3. Mitatut kromin (Cr), kuparin (Cu) ja arseenin (As) liukoisuudet ensimmäisen (6 h) ja toisen mittaussyklin (18 h) jälkeen.

	Cr	Cu	As
	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²
Ref 6 h	0,09	0,08	-
D-S 6 h	2,58	0,29	0,05
Ref 18 h	0,20	0,12	-
D-S 18 h	1,65	0,20	0,04

Puun kyllästeaineiden eli kuparin (Cu), kromin (Cr) ja arseenin (As) osalta havaittiin jonkin verran liukoisuuksia. Laskennallisesti määritetyt kumulatiiviset liukoisuudet testikappaleiden pinta-alaan suhteutettuna olivat seuraavanlaiset: kromi 4,23 mg/m², kupari 0,49 mg/m² ja arseeni 0,09 mg/m². Referenssinäytteeeseen verrattuna kromin liukoisuus D-S näytteessä oli 14-kertainen ja kuparin 2,5-kertainen. Arseenia ei havaittu referenssinäytteessä lainkaan. Ensimmäisen eli 6 tunnin liotussyklin jälkeiset liukoisuudet olivat kaikkien kyllästeaineiden osalta korkeammat kuin toisen eli 18 tunnin liotussyklin jälkeen mitatut liukoisuudet. Tämän pohjalta on todettavissa, että prosentuaalisesti merkittävin liukeneminen kromin, kupari ja arseenin kuin myös muiden havaittujen liukenemien osalta tapahtui ensimmäisen liotussyklin aikana.

Mitatut kyllästeaineiden liukoisuudet edustivat kuitenkin hyvin pientä osuutta kaikista mitatuista liukoisuuksista, sillä selvästi suurin kumulatiivinen liukoisuus havaittiin kalsiumin osalta, noin 8 468 mg/m². Merkittäviä liukoisuuksia ilmeni myös kaliumin (1 421 mg/m²) ja natriumin (1 290 mg/m²) osalta. Myös alumiinin (43 mg/m²) ja raudan (26 mg/m²) osalta mitatut liukoisuudet olivat kromiin verrattuna moninkertaisia. Koekappaleissa sideaineena käytetyn sementin pääraaka-aine on kalkkikivi. Sementtiklinkkeri puolestaan koostuu tyypillisesti viidestä eri alkuaineesta, jotka ovat kalsium (Ca), rauta (Fe), alumiinia (Al), pii (Si) ja happi (O). Tämä selittää testissä havaitut merkittävät liukoisuudet esimerkiksi kalsiumin, alumiinin ja raudan osalta.

5.1.5 Koetuotteet

Kyllästettyä puuta sisältävästä materiaalista valmistettiin erilaisia pilot-tuotteita, kuten pihakiviä ja -laattoja, liikennemerkkijalustoja ja ajoesteitä (kuva 7), valmistettavuuden ja käyttökelpoisuuden selvittämiseksi. Kierrätyspuun osuus valmistetuissa tuotteissa vaihteli välillä 5-10 p-%.



Kuva 7. Valmistettuja koetuotteita; pihakivet, pihalaatta, ajoeste ja liikennemerkkijalusta.

5.2 Massiivipuutuotteet ja -rakenteet

Käytöstä poistetun D-luokan kierrätyspuun materiaalihyödyntämisen edistämiseksi tutkittiin sen liimaus- ja pintakäsittelyominaisuuksia. Liimauskokeissa käytettiin Kiillon valmistamaa polyuretaani- (PUR) -liimaa. PUR-liimat ovat yksikomponenttisia, värittömiä, kovettuvat kosteuden vaikutuksesta huoneenlämpötilassa ja niitä käytetään erityisesti sormijatkosten, kantavien rakenteiden, kuten liimapuun, lamellihirren ja CLT:n valmistukseen. Toisena liimana käytettiin Preferen valmistamaa kaksikomponenttista resorsinoliformaldehydi-(RF)-liimaa. Tällaiset fenoliliimat kovettuvat korkeissa lämpötiloissa ja muodostavat näkyvän, mutta kestävä ja tumman liimasauman ja niitä käytetään erityisesti vanerin ja LVL:n tuotannossa niiden säänkestävyyden takia. Lisäksi vertailussa oli Soudalin

valmistamaa PVAc (3) -liima, joka on kuluttajille suunnattu kosteutta kestävä puuliima sisätiloihin. Tavoitteena oli selvittää, onnistuuko käytöstä poistetun kyllästepuun liimaus ulkokäyttöön soveltuvien tuotteisiin erityyppisillä liimoilla. Lisäksi selvitettiin erilaisten pintakäsittelyaineiden kiinnittymistä kyllästepuun pintaan sekä käsittelyn kykyä hillitä kyllästeaineiden liukenemista ympäristöön.

5.2.1 Liimaus

Ensimmäisessä koestusvaiheessa käytettiin lähinnä vanhempaa CCA-kyllästettyä puuta. Liimausolosuhteet on esitetty taulukossa 4 valmistajien ohjeita mukaillen. Kokeet suoritettiin elokuussa 2020 ja esikokeiden ja kosteusmittausten perusteella koekappaleita ei koettu tarpeelliseksi tasaannuttaa ulkosäilytyksen jälkeen. Puukappaleiden kosteuden keskiarvo oli 16,2 % (n=18) ja keskihajonta 2,6 % (12,6 – 21,6 %). Testeihin valmistauduttiin höyläämällä aihiot tasaisiksi. Laudat olivat pinnasta likaisia ja hyvin epätasaisia, joten noin 10 mm höyläminen oli välttämätöntä liimauksen onnistumiseksi.

Taulukko 4. Liimauksessa käytetyt prosessiolosuhteet.

Liima	Puristuspaine	Puristuslämpötila	Puristusaika
PVAc	1 bar	20°C	60 min
PUR	8 bar	20°C	180 min
RF	13 bar	80°C	5 min

Liimasauman lujuuden testauksessa sovellettiin vanerinliimasauman standardien SFS-EN 314–1 ja SFS-EN 314–2. ns. giljotiinitestä, jota varten valmistettiin useita sarjoja koekappaleita erilaisilla parametreilla (kuva 8). Työssä tutkittiin liimasauman lujuutta ja puustamurtumaprosenttia kolmessa eri olosuhteessa; kuivana (huoneilma), 24 h vesiliotuksen jälkeen sekä keittämisen (4h kiehumus + kuivaus 60°C / 20h + 4h kiehumus) jälkeen. Jokaiseen olosuhteeseen valmisteltiin koekappaleita 7 eri laudasta, yhteensä 35 koekappaletta molempiin syysuuntiin.



Kuva 8. Koekappaleita (halkaisija 32 mm) ennen liimasauman ns. giljotiinistausta. (Kuva: Inkiläinen 2020)

Liimaus onnistui keskimäärin hyvin, lukuunottamatta PVAc-liimaa, joka liotuksen jälkeen ei odotetusti enää suoriutunut testeistä. Myös osa RF-liimalla liimatuista kappaleista epäonnistui puun runsaan kasaan puristumisen vuoksi (mahdollisesti heikon puulaadun tai puristimessa ilmenneiden ongelmien vuoksi). Taulukossa 5 on esitetty lujuudet sekä puustamurtuma-% PUR- sekä RF-liimoille. Vertauksena käsittelemättömän ja neitseellisen männyn PUR-liiman liimasauman lujuus kuivana syysuuntaan oli 7,4 N/mm² ja puustamurtuma 80 %, eli kierrätyspuu suoriutui vähintään yhtä hyvin kuin ei kierrätetty.

Taulukko 5. Liimasauman lujuus ja puustamurtuma-% PUR-liimalle syysuuntaan ja syitä poikkisuuntaan mitattuna sekä RF-liimalle syysuuntaan mitattuna kuivalle, vesiliotuksen jälkeen sekä kiehuttamisen jälkeen.

PUR <u>syysuunta</u>	Lujuus N/mm ²	Puusta- murtuma
Kuiva	8,5	90 %
24h liotus	3,7	20 %
Keittäminen	3,2	30 %

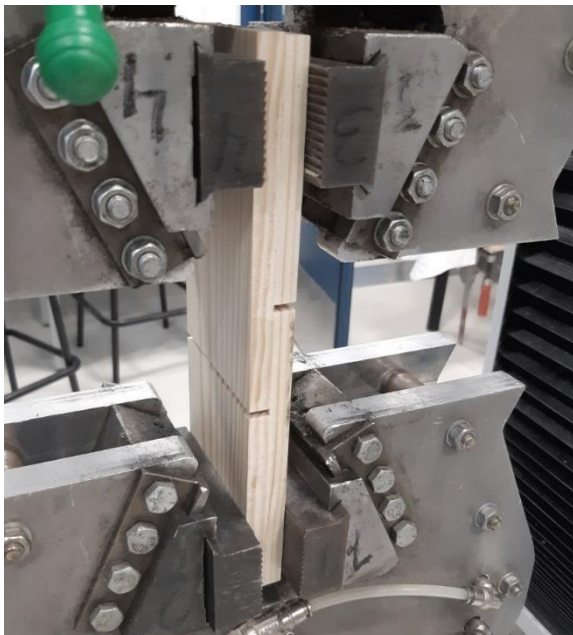
PUR <u>poikkisyv</u>	Lujuus N/mm ²	Puusta- murtuma
Kuiva	3,6	90 %
24h liotus	2,0	20 %
Keittäminen	1,8	30 %

RF <u>syysuunta</u>	Lujuus N/mm ²	Puusta- murtuma
Kuiva	10,2	100 %
24h liotus	3,8	90 %

Toisessa liimauskokeessa keskityttiin kierrätettyyn C-kyllästettyyn puutavaraan. Liimoina olivat jälleen RF-liima (Prefere Resins, 14J414 + 24J376) sekä PUR-liima (Kiilto Oy, D4 Polyureataani), sillä ne osoittivat ensimmäisessä vaiheessa lupaavia tuloksia. Tässä vaiheessa oli tammikuu 2021 ja

ulkosäilytyksessä oleva kierrätyspuu jäässä. Yksi merkittävä haaste olikin puun runsas halkeilu sisätiloihin tuodessa ja työstäessä, jolloin osa puumateriaalista piti hylätä.

Tässä koeasetelmassa sovellettiin SFS-EN 205:2016 -standardia, jossa kaksi lautaa liimattiin yhteen, lovettiin mittausalueen molemmiin puolin ja vedettiin päistään, kunnes kappale murtui (kuva 9). Tarkoituksena oli saada mahdollisimman suuri pinta-ala testaukseen, sillä kierrätyspuun laadussa voi olla paljon vaihtelua ja toisaalta kyllästepuussa voi olla kyllästeaineiden pistemäistä vaihtelua aineiden vaihtelevan tunkeutuman takia (esim. sydänpuuhun).



Kuva 9. Liimasauman lujuuden mittauksen koeasetelma. (Kuva: Juhani Kakriainen)

Taulukossa 6 on esitetty liimasaumojen lujuudet sekä erikseen kuivana ja märkänä mitattuna. Lisäksi vastaavasti puustamurtuma-% on esitetty kuivana ja märkänä. Taulukkoon on myös eroteltu AB- ja A-luokan kyllästepuiden tulokset. Lautojen paksuuksien perusteella pystyttiin erottelemaan A- ja AB-luokan kyllästepuut, sillä kaikki 48mm paksut (ja paksummat) kestopuut suojataan vaativampien käyttöolosuhteiden NTR A-luokkaan ja alle 48mm paksut tuotteet, esim. terassilaudat ja rimat, suojataan aina NTR AB-luokkaan, joka on tarkoitettu maan yläpuolisiin rakenteisiin (Kestopuu 2020).

Taulukko 6. Liimasauman lujuudet ja puustamurtuma-% PUR- ja RF-liimoille kuivana ja märkänä mitattuna sekä AB- ja A-luokan kyllästepuulle eroteltuna. (stdev = keskihajonnat lujuuksille).

	Lujuus N/mm ²	stdev	Kuivana	stdev	Märkänä	stdev	Puustamur- tuma-%	Kuivana	Märkänä
PUR keskiarvo	2,63	0,79	2,83	0,94	2,41	0,53	78,09	93,96	61,52
RF keskiarvo	2,68	0,96	2,79	0,95	2,58	0,96	85,43	88,75	81,96
AB keskiarvo	2,49	0,72	2,52	0,69	2,47	0,75	85,39	87,10	86,02
A Keskiarvo	2,85	1,01	3,16	1,07	2,53	0,82	77,44	76,00	75,00

Yhteenvetona tuloksista voidaan todeta, että liimauskokeissa käytöstä poistettua kyllästepuuta liimattiin onnistuneesti ja riittävät liimasauman lujuudet saavutettiin (vastaavat kuin neitseellisellä käsittelemättömällä puulla). PUR-liima kesti hieman heikommin kosteutta ja tuloksien perusteella voidaan epäillä, että liima ei tunkeutunut riittävästi puun rakenteeseen. PUR-liima voisi soveltua näiden tuloksien perusteella vähemmän haastaviin kosteusolosuhteisiin ja hyvien levitysominaisuuksien sekä värittömyytensä perusteella esimerkiksi kalusteisiin ja pienemmän mittakaavan tuotantoprosesseihin. RF-liiman kosteudenkesto oli hieman parempaa, joten se voisi soveltua vaativampiin kohteisiin sekä kaksikomponenttisena liimana mieluummin teolliseen tuotantoon. Toisaalta molempien liimojen osalta on syytä vielä tehdä lisätestejä mahdollisen lopputuotteen varsinaista käyttöä ja vaatimuksia ajatellen.

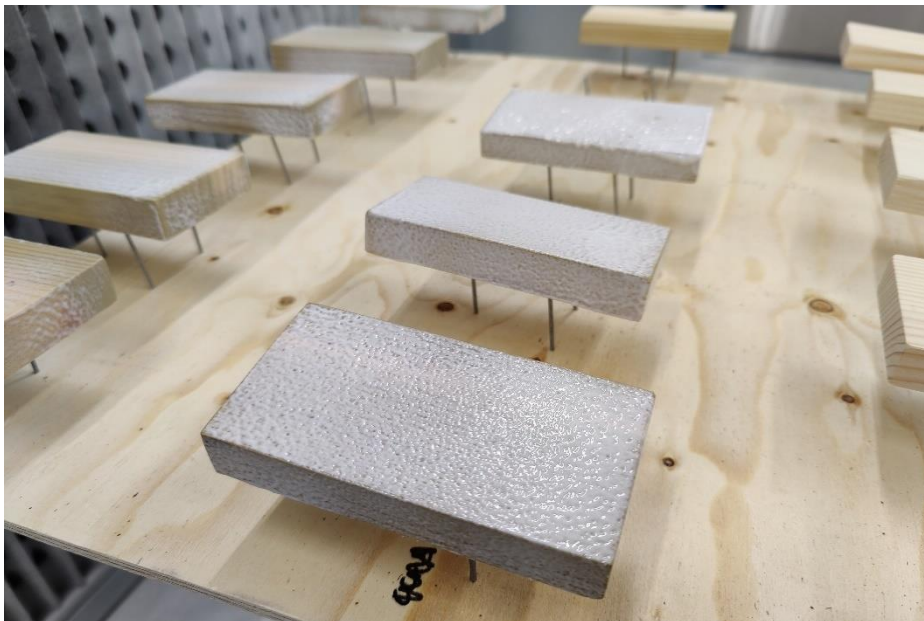
Kyllästeainepitoisuuksilla tai liimattujen koekappaleiden tiheyksillä ei havaittu yhteyttä liimasauman lujuuteen tai puustamurtumaprosenttiin. A-luokan kyllästepuun tulokset olivat hieman paremmat AB-luokan puuhun verrattuna, mutta toisaalta A-luokan puutavara on myös lähtökohtaisesti eritasoista ja erityisesti kantaviin rakenteisiin tarkoitettua. Materiaalin tiheys vastasi männyn keskimääräistä tiheyttä. Lähtömateriaalin fysikaalisia ominaisuuksia ei toisaalta tutkittu erityisen tarkkaan ja voisikin olla kiinnostava jatkotutkimuksen aihe pyrkiä arvioimaan käytöstä poistetun puun mekaanisia ja muita ominaisuuksia rikkomattomilla menetelmillä. Toisaalta myös halkeilun minimointi varastointiolosuhteet huomioiden olisi hyödyllistä tutkittavaa.

5.2.2 Pintakäsittely

Tässä osiossa tutkittiin CCA- sekä C-kyllästeitä sisältävän, käytöstä poistetun mäntypuutavaran pintakäsittelyn tarttuvuutta puumateriaaliin sekä kyllästeaineiden liukenemista veteen pintakäsittelyn läpi. Pintakäsittelyaineiksi valikoitiin seuraavat vaativaan ulkokäyttöön tarkoitetut tuotteet tarvittavine pohjusteineen:

- Teknos Teknol JRM. Vesiohenteinen, akrylaatti pohjainen reunamaali.
- Teknos Visa Premium. Vesiohenteinen, akrylaatti-alkydi pohjainen hybridisideainemaali.
- Teknos Woodex Aqua Wood Oil. Vesiohenteinen luonnonöljy ulkokäyttöön.
- Tikkurila Unica Super 90. Lakkabensiiniohenteinen uretaanialkydilakka. (Vene)

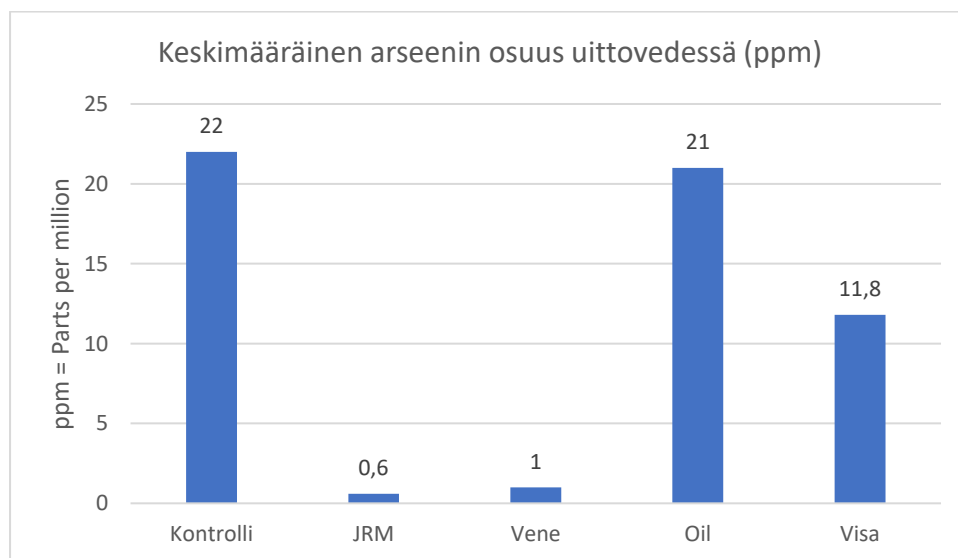
Jokaiselle pintakäsittelylle valmistettiin viisi testikappaletta kustakin testattavasta puutavaratyypistä; CCA-kyllästetystä mäntykierrätyspuusta, C-kyllästetystä mäntykierrätyspuusta sekä kyllästämättömästä mäntysahatavarasta. Jokaisesta laudasta sahattiin yhteensä viisi kappaletta testikappaleita, joista neljä kappaletta pintakäsiteltiin eri aineilla ja joista yksi jätettiin pintakäsittelemättä. Yhteensä testikappaleita valmistettiin 75 kappaletta. Tähän kappalemäärään sisältyi neljä eri pinnoitetyyppeä sekä pinnoittamattomat kontrollikappaleet. Puutavaran halkeilu oli tässäkin osiossa haasteena jäisen puumateriaalin vuoksi, mutta valikoiduista laudoista kappaleet höylättiin ja sahattiin mittoihinsa (pit. 130 x tang. 70 x rad. 20 mm³). Kuvassa 10 on esitetty Teknol JRM -maalilla käsiteltyjä koekappaleita kuivumassa.



Kuva 10. Teknol JRM -maalilla käsiteltyjä koekappaleita kuivumassa. (Kuva: Ikonen 2021)

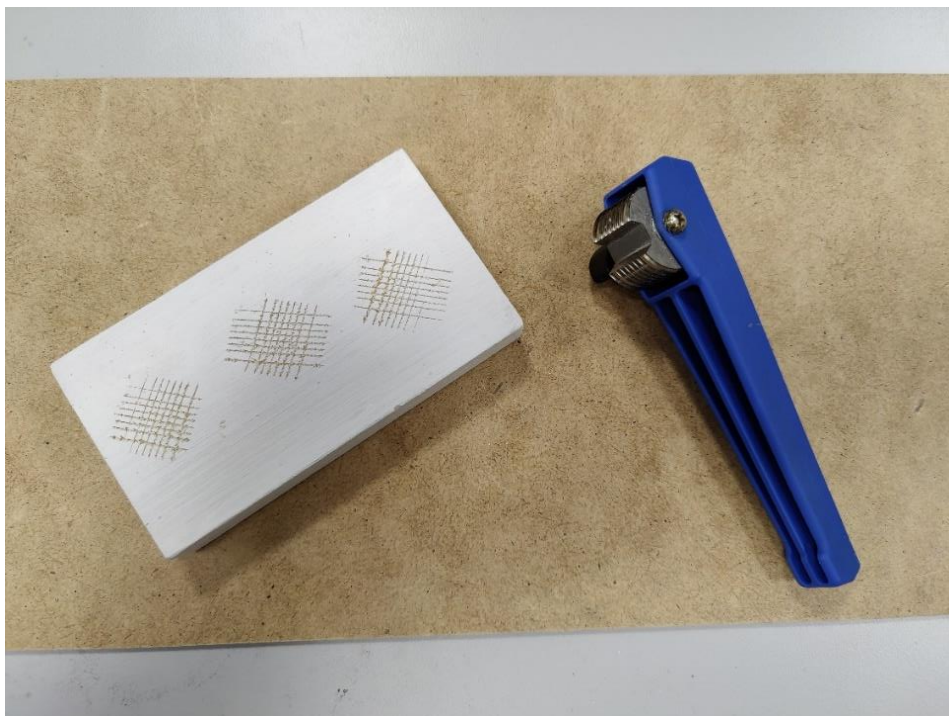
Valmistajan ohjeiden mukaisen pintakäsittelyn jälkeen koekappaleita uitettiin 14 vuorokautta ja uittovedestä mitattiin XRF-laitteella alkuainepitoisuudet erityisesti arseenipitoisuutta arvioiden. Pitoisuudet eivät ole tässä absoluuttisia mutta keskenään vertailukelpoisia ja antavat suuntaa veteen liuenneiden alkuaineiden määristä. Tuloksista (kuva 11) voidaan huomata, että kalvoa muodostavilla

Teknol JRM -maalilla sekä Unica Super 90 -lakalla (Vene) käsitellyistä kappaleista ei ole liennut merkittäviä määriä arseenia vesinäytteeseen verrattuna muihin käsittelyihin sekä käsittelemättömään materiaaliin. Näiden pintakäsittelyiden vedenläpäisykyky (kappaleen painon muutos uiton aikana) oli myös alhaisempi muihin verrattuna. Toisaalta myös kalvoa muodostavalla Visa Premium -maalin vedenläpäisy oli samaa luokkaa Teknol JRM:n sekä Unica Super 90:n kanssa, mutta uittoveden arseenipitoisuus oli kuitenkin korkeampi.



Kuva 11. Keskimääräinen arseenin osuus eri tavoin käsiteltyjen CCA-kyllästettyjen kappaleiden uittovesinäytteessä (Ikonen 2021)

Uiton jälkeen kappaleille tehtiin standardin SFS-EN ISO 2409 mukainen hilaristikkokoe, jossa määritettiin pintakäsittelyn tarttuvuus puumateriaaliin 14 vuorokauden uiton jälkeen. Koe suoritettiin Teknol JRM, Visa Premium sekä Unica Super 90 (Vene) pinnoitetuille kappaleille, koska kyseiset pintakäsittelyaineet muodostavat selkeän kalvon, mikä on kokeen suorittamisen edellytys. Koestuksessa käytettiin standardin vaatimaa, käsikäyttöistä hilaristikkotyökalua, jolla naarmutettiin koekappaleen pintaa (kuva 12). Yhteen koekappaleeseen naarmutettiin yhteensä kuutta (6) ristikköä, kolme kappaletta per puoli. Hilaristikkotestin päätarkoituksena on tarkkailla eri pinnoitteiden hilseilyä sekä adheesiota. Hilaristikoille annettiin arvosana asteikolla 0–5 noudattaen standardin vaatimuksia niin, että 0 on paras tulos ja 5 huonoin. CCA-kyllästetty sekä kyllästämätön mänty saivat kumpikin keskimääräisen arvosanan 1 jokaisesta pinnoitteesta. C-kyllästetty mänty suoriutui testeistä huonommin keskiarvolla 2 jokaisen pinnoitteen kohdalla. Eri pintakäsittelyaineiden välillä ei havaittu merkittäviä eroja tuloksissa.



Kuva 12. Hilaristikkotestin koeasetelma pintakäsittelylle kyllästepuulle (Kuva: Joona Ikonen)

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että käytöstä poistettua kyllästepuuta voidaan pintakäsitellä onnistuneesti ja osa kalvoa muodostavista käsittelyaineista voi merkittävästi vähentää kyllästeaineiden (arseenin) liukenemista veteen.

6 Uusien tuotteiden muotoilu ml. modulaarisuus sekä testaus

Uusien tuoteaihioiden kehittämiseen hyödynnettiin syksyllä 2020 LAB-ammattikorkeakoulun puutekniikan tutkinto-ohjelman Tuotekehitysprojekti-kurssia, jossa tehtiin yhteistyötä muotoilun opetuksen kanssa ja kurssille kutsuttiin myös muotoilun opiskelijat mukaan. Tehtävänä oli suunnitella piharakentamisen tuotteita käytöstä poistetusta kyllästepuusta. Esimerkkituotteita olivat mm. roskastia, aitaelementti, roskakatos, puunsuoja sekä polkupyöräteline, josta tehtiin myös jatkoprojekti ja prototyyppi. Lisäksi muotoilunopiskelija suunnitteli projektityönä huonekalusarjan kierrätyspuuta hyödyntäen.

6.1 Tuotekehitysaiheita

Puunsuojan kehittämissä pääteemana oli vaihtelevan puumateriaalin estetiikan hyödyntäminen sekä yksinkertainen valmistusprosessi. Puunsuojan vaihtelevat puukappaleet on kiinnitetty yhteen köyden/liinan avulla (kuva 13). Toisessa versiossa kiinnitys ja rakenne oli jäykistetty puisella rungolla. Puunsuojaa voi hyödyntää rakennustyömailla, taimien suojauksessa tai koristeena esimerkiksi kukkaistutuksien kanssa. Tuotekehitysprojektitiimissä olivat puutekniikan opiskelijat Tapio Tanskanen, Joona Auvinen, Niko Kirjokivi ja Mikko Ojapalo sekä teollisen muotoilun opiskelija Aaro Sipolainen.



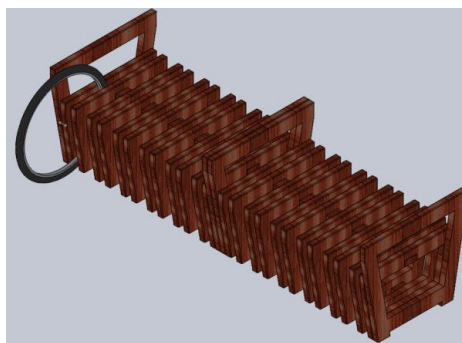
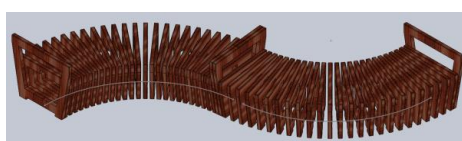
Kuva 13. Tuoteidea ja prototyyppi puunsuojasta, joka on valmistettu kierrätyspuusta. (Kuva: Tapio Tanskanen)

Roska-astian (kuva 14) rakenne perustuu metallisiin kehiin, joiden väliin voidaan asettaa puukappaleita. Tämä mahdollistaa puukappaleiden leveyden vaihtelun ja mahdollisten lyhyiden hukkapalojen hyödyntämisen sekä korjaamisen puukappaleita vaihtamalla. Tuotekehitysprojektitiimissä olivat puutekniikan opiskelijat Petriina Peltonen, Erno Ryyänen, Heli Laine ja Annette Kallberg sekä teollisen muotoilun opiskelija Milla Kulju.



Kuva 14. Tuoteidea roska-astiasta, jossa on hyödynnetty kierrätettyä puuta. (Kuva: Milla Kulju)

Polkupyörätelineen suunnitelmassa lähtökohtana oli tehdä ratkaisu, jossa puun työstön olisi minimoitu ja raaka-aineen vaatimukset eivät ole liian tiukat. Ensimmäinen prototyyppi tehtiin seinäkiinnitettäväksi malliksi, mutta kehittelyn lopputuloksena suunniteltiin kehärakenne, jossa kehät muodostavat jonon ja polkupyörän renkaan saa asetettua kehien väliin (kuva 15). Rakenne mahdollistaa valmistamisen eri paksuisesta puusta, kunhan saman kehän materiaalit ovat samaa paksuutta. Kaikki katkaisusahaustyöstöt ovat samassa kulmassa (12 astetta), joten katkaisutähtiä ei tarvitse muuttaa jatkuvasti. Kiinnitykset ovat joko ruuveilla tai liimalla sekä tapeilla. Rakenteessa hyödynnetään modulaarisuutta, jossa pyörätelineen pituutta voi säätää kehien lukumäärällä tai asetella ne myös kaarevaan muotoon.



Kuva 15. Polkupyörätelineen 3D-mallinnukset ja prototyyppi, joka on valmistettu käytöstä poistetusta kyllästepuusta ja käsitelty ulkokäyttöä varten ruskealla sävyllä. (Kuva: Erno Ryyänen)

Prototyyppi valmistettiin C-kyllästetystä jätetuusta. Puuta työstäessä tuli varmistaa pölyn hallinta ja ihon suojaus, mutta muutoin käsittely vastasi lähes tavanomaista puuta tällaisessa tuotteessa. Kokeilu siis osoittaa, että halutessa kierrätyspuusta pystyy tekemään toimivia tuotteita. Tämän tuotteen suunnittelusta vastasivat puutekniikanopiskelijat Erno Ryyänen, Alex McIntyre, Janne Hujanen ja Juhana Hirn.

6.3 Huonekalusarja

Huonekalusarjan suunnittelussa keskiössä oli esteettiset kalusteet, joissa hyödynnetään hukkapaloja sekä käytöstä poistettua lautatavaraa mahdollisimman pienillä työstöillä (kuva 16). Asettelen estetiikka muodostuu käytettävissä olevan materiaalin määrän ja rakenteen kestävyys ehdoilla. Ajatuksena on, että Kestopuu materiaalina on olemassa "ikuisuuden", joten tuotteen tyylin soisi kestävän myös aikaa. Käytännön seikat, kuten halkeaminen täytyy ottaa huomioon kalustetta suunnitellessa. Kiilamaiset jalkaosat ovat sellaisia kuin ovat suuresti tästä syystä. Lyhyistä kappaleista rakennetut kehät muodostavat mahdollisimman kestävä ja suuren pinnan, joka toimii modulaarisena osana eri huonekaluja, ja on myös skaalautuva. Toki on hyvä muistaa myös sosiokulttuurillinen kestävyys, kädentaitojen siirtäminen tuleville sukupolville. Suunnittelija on sisustusarkkitehtuurin ja kalustemuotoilun opiskelija Mikko Pinola, joka osallistuu suunnitelmallaan myös Vuoden Artesaani -kilpailuun.



Kuva 16. Mikko Pinolan Kylläs-sarjan ulkokalusteita kierrätetystä kyllästepuusta (Kuvat: Mikko Pinola)

7 Viestintä

Hankkeelle luotiin oma verkkosivu (<https://lab.fi/fi/projekti/rapupuu>), josta löytyi perustiedot hankkeesta. Lisäksi hanketiedot lisättiin Puutuoteteollisuuden Hankeportaaliin ([https://www.hankeportaali.fi/hankkeet/208-rakennus-ja-purkupuusta-valmistettujen-tuotteiden-tuoteturvallisuus-\(rapupuu\)](https://www.hankeportaali.fi/hankkeet/208-rakennus-ja-purkupuusta-valmistettujen-tuotteiden-tuoteturvallisuus-(rapupuu))). Hankkeen aikana siitä viestittiin esimerkiksi LAB-Focus blogiteksteissä, joissa kuvailtiin hankkeen tavoitteita ja toisaalta kyllästepuun kierrätykseen liittyvistä haasteista:

- Lillqvist, K. 2020: "Purkupuun uudelleen käyttöön" <https://blogit.lab.fi/labfocus/purkupuun-udelleen-kayttoon/>
- Seppälä, T & Lillqvist, K. 2021. "Purkupuun kierrättämisestä" <https://blogit.lab.fi/labfocus/purkupuun-kierrattamisesta/>
- Ikonen, J & Lillqvist, K. 2021. "Ongelmajätteestä uusiokäyttöön" <https://blogit.lab.fi/labfocus/ongelmajatteesta-uusiokayttoon/>

Hanketta esiteltiin myös LAB-ammattikorkeakoulun Green Design -Ratkaisuja kestäväan kehitykseen, ympäristövastuullisuuteen ja kiertotalouteen -julkaisussa <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-827-356-4> (Lillqvist, K: Kestävää, kiertävää puuta). Tuloksia esiteltiin myös LAB Pro -julkaisussa <https://www.labopen.fi/lab-pro/tutkimuksia-puun-kierratyksesta/> (Lillqvist, K: Tutkimuksia puun kierrätyksestä). Lisäksi hankkeelle tehtiin digitaaliseen käyttöön hyödynnettävä juliste, jota oli myös mahdollista tulostaa tarpeen mukaan (kuva 17).

Hankkeen puitteissa julkaistiin opinnäytetöitä LAB-ammattikorkeakoulussa:

- Inkiläinen, Nina (2020): Kierrätetyn puun liimausominaisuudet
 - <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202011322777>
- Seppälä, Taneli (2020): Selvitystyö rakennus- ja purkupuumateriaalissa esiintyvistä nykyisin kielletyistä ja säädellyistä aineista
 - <https://www.theseus.fi/handle/10024/352808>
- Ikonen, Joona (2021): Kierrätyspuun pintakäsittelyominaisuudet
 - <https://www.theseus.fi/handle/10024/500985>
- Frolova, Yana (2021): Puun kierrätyksen mahdollisuuksia: RAPUPUU-hanke
 - <https://www.theseus.fi/handle/10024/503103>

Opinnäytetöitä tehtiin myös LUT-yliopistossa seuraavasti:

- Yadav, Manjeet (2021): Product safety of a ceramic composite filled with recycled wood waste material
 - <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021062440070>
- Cheerika, Nishant (2021): Sorting of impregnated wood
 - <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021110153191>

LUT:n osalta hankkeen tuloksia esiteltiin myös kansainvälisessä vertaisarvioidussa Pro Ligno -tieteellisessä lehdessä julkaistussa artikkelissa “Hyvärinen, M, Yadav, M & Kärki, T: The Freeze-Thaw Resistance and Leaching of Impregnated Wood Waste-Cement Composites”
https://www.proligno.ro/en/articles/2021/4/HYVARINEN_Final.pdf.

Suoritettujen viestinnällisten toimenpiteiden ja yllä mainittujen opinnäytetöiden ansiosta hankkeeseen ja sen tuloksiin liittyvää informaatiota on tarjolla useissa eri viestintäkanavissa. Tämä mahdollistaa tiedon ja tulosten laajan hyödyntämisen tulevaisuudessakin.



RAPUPUU-hankkeessa selvitetään puupohjaisten rakennus- ja purkujätteestä sekä kyllästetystä puusta valmistettujen tuotteiden tuoteturvallisuutta ja demonstroidaan pilottituotteilla käyttökelpoisuutta eri käyttökohteissa.

Purkupuut uudelleen käyttöön!



Tavoitteena on pyrkiä palauttamaan käytöstä poistettua puuta entistä enemmän uuteen, korkeamman jalostusasteen käyttöön edistämällä kiertotalouden, jätteettömän maailman ja vähähiilisuuden periaatteiden toteutumista.

LAB University of Applied Sciences

[HTTPS://LAB.FI/FI/PROJEKTI/RAPUPUU](https://lab.fi/fi/projekti/rapupuu)

// PROJEKTIN TOTEUTUSAIKA: 1.2.2020–30.6.2021 //
TOTEUTTAJAT: LUT-YLIOPISTO, LAB-AMMATTIKORKEAKOULU, DEMOLITE // BUDJETTI: 420 266 € //

Kuva 17. RAPUPUU-hankkeen digitaalinen juliste.

8 Yhteenveto

Rakennus- ja purkupuusta valmistettujen tuotteiden tuoteturvallisuus (RAPUPUU) –hankkeen tavoitteena oli tutkia ja selvittää C/D-luokan purkupuun materiaalihyötykäytön tehostamista uusissa tuotesovelluskohteissa materiaaliominaisuuksien ja tuoteturvallisuuden näkökulmasta. Pyrkimyksenä oli edesauttaa tiukkenevien kierrätystavoitteiden saavuttamista kierrättäen purkupuuta nykyistä enemmän ja resurssitehokkaammin sekä palauttaa enemmän jättemateriaaleja uuteen, korkeamman jalostusasteen käyttöön. Konkreettisten tuote-esimerkkien avulla pyrittiin myös osoittamaan avulla mahdollisuuksia ja haasteita, joita liittyy purkupuun uusiokäyttöön.

Rakennus- ja purkujätteen määrän arviointi on haastavaa johtuen tilastoinnin hajanaisuudesta ja osin myös sen päällekkäisyyksistä ja puutteista. On arvioitu, että Suomessa syntyvän puujätteen määrä olisi vuositasona noin 200 000–250 000 tonnia. Rakennus- ja purkupuuta sekä puumuovikomposiitit määritellään kuuluvaksi käytöstä poistetun puun luokkaan C, joka sisältää puujätteen ohella erilaisia määriä muita materiaaleja, kuten metalleja, lasia ja muovia. Tämä aiheuttaa omat haasteensa kierrätykselle. Vastaavasti puunkyllästysaineilla käsitelty puu määritellään kuuluvaksi luokkaan D. Tähän luokkaan kuuluvalla puujätteellä on oma reittinsä kierrätyksen suhteen. D-puujätteen osalta jätelajin sisäistä vaihtelua aiheuttaa eri kyllästysaineita sisältävät puutuotteet. Tehtyjen kenttäkokeiden pohjalta on todettavissa, että D-puun osalta kierrätyspuun määrät jakautuvat melko tasan kuparikyllästettyjen ja CCA-kyllästettyjen välillä.

Kyllästetyn puun teollisessa lajittelussa tavoitteena olisi erotella kuparikyllästeitä sisältävät puukappaleet CCA-kyllästeillä kyllästetyistä puukappaleista nopeasti ja luotettavasti sekä mahdollisimman suurella kapasiteetilla. Tämä on mahdollista lajittelulinjastoratkaisussa, jossa lajittelu suoritetaan online-mittauksena suoraan kuljetushihnalta. Manuaalinen lajittelu käsikäyttöisiä mittalaitteita käyttäen tulee kyseeseen ainoastaan linjastolajittelun kontrollimenetelmänä tai pienten erien lajittelussa. Kyllästetyn puun lajitteluun soveltuvia online-mittausmenetelmiä ovat XRF- ja LIBS-teknologiat, jotka mahdollistavat puukappaleiden sisältämien alkuaineiden ja niiden määrien analysoinnin. Edellä mainituista teknologioista on eri tutkimuksissa todettu XRF:n olevan luotettavampi ja kustannustehokkaampi vaihtoehto kyllästetyn puun lajitteluun. Myös kuvantamismenetelmät kuten NIRS ja ovat kehittyneet selvästi ja siten nostaneet potentiaalisuuttaan varteenotettavana lajitteluteknologiana.

Kierrätyspuusta valmistettujen betoni-/geokomposiittien mekaanisia lujuusominaisuuksia tutkittiin puristuslujuuden näkökulmasta. Tutkituista lisäaineista masuunikuona paransi selvästi eniten

puristuslujuutta. Surfactant-lisäaineen vaikutus puristuslujuuteen oli negatiivinen, sillä se vähensi puristuslujuutta referenssikappaleeseen verrattuna. Koekappaleiden tiheyksien osalta havaittiin, että kaikki tutkitut lisäaineet paransivat koekuutioiden tiheyttä referenssikappaleeseen verrattuna. Säänkestävyyden osalta tutkittiin erilaisten betonin lisäaineiden vaikutusta ja havaittiin, että referenssikappaleen eli pelkästään D-puuta sisältäneen koekappaleen massahävikki oli pienin tutkituista koekappaleista. Lisäaineistetuista koekappaleista aluminaattisementtiä ja Surfactantia sisältäneiden koekappaleiden massahävikki oli alhainen. Suurin massahävikki, ts. heikoin säänkestävyys, ilmeni masuunikuonaa sisältäneessä koekappaleessa. Vastaavasti masuunikuonan lisäyksen positiivinen vaikutus tiheyteen ja puristuslujuuteen oli selvästi merkittävin, sillä referenssikappaleeseen verrattuna tiheys parani noin kolmanneksen ja puristuslujuus kasvoi viisinkertaiseksi. Voidaankin todeta, että koetuotteiden kestävyyden osalta ei havaittu seikkoja, jotka voisivat estää C- tai D-luokan kierrätyspuun käytön kyseisissä esimerkkituotesovelluksissa. Mekaanisten lujuusominaisuuksien ja säänkestävyyden osalta jatkotutkimus erilaisilla lisäainemäärillä ja D-puun osuudella olisi erittäin tärkeää, jotta kyetään paremmin optimoimaan seossuhteet, jopa tuotesovelluskohtaisesti. Tutkimustulosten perusteella on kuitenkin todettavissa, että kestävyysominaisuuksissa on yhä paljon kehitettävää, jotta päästään samalle tasolle betonituotteiden K30-lujuusluokan kanssa.

Tuoteturvallisuuteen liittyvissä materiaalitestauksissa ei tutkittujen D-puuta sisältäneiden koekappaleiden osalta havaittu mainittavaa eroavaisuutta referenssikappaleisiin verrattuna. Emissiomittauksissa D-puuta sisältäneen koekappaleen VOC- ja ammoniakkiemissiot jäi selvästi alle mallihuonepitoisuuksien. Liukoisuustestissä havaittiin melko alhaisia pitoisuuksia kromin, kuparin ja arseenin osalta. Näiden tulosten pohjalta on todettavissa, ettei kyllästetyn puun käytölle pilotoiduissa sementtikomposiittituotteissa ole varsinaisia esteitä, mutta nämä tuote- ja käyttöturvallisuuteen liittyvät seikat lienee syytä varmistaa tarkemmilla jatkotutkimuksilla.

Massiivipuun liimauskokeissa käytöstä poistettua kyllästepuuta liimattiin onnistuneesti ja riittävät liimasauman lujuudet saavutettiin (vastaavat kuin neitseellisellä käsittelemättömällä puulla). Kyllästeainepitoisuuksilla ei havaittu olevan yhteyttä liimasauman onnistumiseen. Pintakäsittely onnistui erityisesti kalvoamuodostavilla pintakäsittelyaineilla, joilla pystyttiin myös hillitsemään kyllästeaineen liukenemista uittoveteen. Sen sijaan ulkosäilytyksessä olevan jäisen puun halkeilu sekä yleisesti puun laatuvariaatiot aiheuttivat osin haasteita puun työstössä. Kierrätyspuun laatuluokitus rikkomattomilla menetelmillä voisikin olla kiinnostava jatkotutkimus tässä aihepiirissä. Tuotemuotoilukokeilut osoittivat, että käytöstä poistetusta kyllästepuusta voidaan valmistaa toimivia ja esteettisesti kiinnostavia tuotteita. Jatkossa näitä tuoteaiheita voisi kehittää tuotteistamisen

näkökulmasta tekemällä esimerkiksi markkinatutkimuksia, ympäristövaikutusanalyysijä sekä valmistamisen kustannusmalleja.

Tulosten kestävyys ja hyödyntäminen

Hankkeessa tehdyn tutkimustyön perusteella voidaan todeta, että kierrätyspuun (C/D) materiaalihyödyntäminen tarjoaa paljon mahdollisuuksia, joskin samalla myös haasteita. Purkupuun eli C-puun osalta tarjolla on paljon erilaisia potentiaalisia vaihtoehtoja tuotesegmenteistä, kunhan C-puujätteen vaihteleva koostumus ja tuotteille asetetut materiaaliominaisuudet kohtaavat. D-puun eli kyllästetyn puun osalta keskeisessä roolissa on eri kyllästeaineita sisältävien puujätteiden lajiteltavuus. Tarkalla ja tehokkaalla lajittelulla voidaan CCA-kyllästetyt erottaa kuparikyllästetyistä tuotteista, jolloin molempien mahdollinen jatkohyödyntäminen selkeytyy. Kuparikyllästeaineita sisältävien puujätteiden uusiokäyttö materiaalina tarjoaa runsaasti potentiaalia. On kuitenkin tärkeää muistaa, että kyllästepuuta sisältävien uusiotuotteiden käyttösovellukset ovat riippuvaisia lainsäädännön asettamista rajoitteista, koska kyllästetty puu luokitellaan vaaralliseksi jätteeksi ja täten sen käsittelyssä tulee noudattaa annettuja turvallisuusohjeita.

Suosituksia tulevia hankkeita ja ohjelmia varten

Potentiaalisten tuotesovelluksien tai käyttökohteiden kartoittamisella ja kattavalla materiaaliteknisellä tutkimuksella erityisesti tuoteturvallisuuden osalta voidaan lisätä kierrätyspuun materiaalihyötykäyttöä merkittävästi ja täten vastata paremmin jätteiden kierrätykselle asetettuihin tavoitteisiin ja vaatimuksiin. Edellä mainituin toimin kuin myös kierrätysmateriaalista valmistettujen tai kierrätysmateriaalia sisältävien tuotteiden julkisen hyväksyttävyyden lisäämisellä voidaan edesauttaa materiaalina kierrätyksen kasvua kohti sille asetettuja tavoitteita.

Lähteet

- Alakangas, E, Kurki-Suonio, K, Tikka, T & Fredriksson, T. 2017. Käytöstä poistetun puun luokittelun soveltaminen käytäntöön. VTT. Tutkimusraportti. VTT-M-01931-14. [Viitattu 23.4.2020]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-M-01931-14.pdf>
- Auvinen et al. 2002. Puutuoteteollisuus 3 – Puusepänteollisuus. Opetushallitus. 266 s.
- ECHA. 2020a. CLP-asetus tutuksi. Euroopan kemikaalivirasto. [Viitattu 11.7.2020]. Saatavissa: <https://echa.europa.eu/fi/regulations/clp/understanding-clp>
- ECHA. 2020b. REACH-asetus tutuksi. Euroopan kemikaalivirasto. [Viitattu 11.7.2020]. Saatavissa: <https://echa.europa.eu/fi/regulations/reach/understanding-reach>
- Hasan, R, Schindler, J, Solo-Gabriele, H & Townsend, T. 2011a. Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology. Part I: Detection of preservative-treated wood waste. Waste Management. 31:688-694.
- Hasan, R, Schindler, J, Solo-Gabriele, H & Townsend, T. 2011b. Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology. Part II: Sorting efficiencies. Waste Management. 31:695-704.
- Hautamäki, A. 2020. Puu- ja puualumiini-ikkunan elinkaariselvitys. Opinnäytetyö. LAB-ammattikorkeakoulu. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/349325/Artturi_Hautamaki.pdf?sequence=2
- Häkämies, S, Lähdesmäki-Josefsson, K, Pitkämäki, A & Lehtonen, K. 2019. Puupohjaisen rakennus- ja purkujätteen kiertotalous. Gaia Consulting Oy & Ytekki Oy. Loppuraportti. [Viitattu 28.4.2020]. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B03D4B199-2FF6-43DA-93A3-96C19B5B78E0%7D/155463>
- Ikonen, J. 2016. Jätteiden kemiallisten ominaisuuksien spektrometriset online-mittausmenetelmät. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 108 s. [Viitattu 10.6.2021]. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/122881/Diplomityo_Ikonen_Jaana.pdf?sequence=2
- Ikonen, J. 2021. Kierrätyspuun pintakäsittelyominaisuudet: RAPUPUU-hanke. Opinnäytetyö, LAB-ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/500985>
- Inkiläinen, N. 2020. Kierrätetyn puun liimausominaisuudet. Opinnäytetyö, LAB-ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/347629>
- Jätelaki 646/2011. [Viitattu 7.7.2020]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>
- Kamppuri, T, Heikkilä, P, Pitkänen, M, Hinkka, V, Viitala, J, Cura, K, Zitting, J, Lahtinen, T, Knuutila, H, & Lehtinen, L. 2019. Tunnistusteknologiat tekstiilien kierrätyksessä VTT. Tutkimusraportti Nro VTT-R-00092-19. [Viitattu 17.6.2021]. Saatavissa: https://cris.vtt.fi/ws/files/24214371/VTT_R_00092_19.pdf
- Kestopuuteollisuus ry. 2011. Paineekyllästetyn kestopuun käyttöturvallisuusohje. [Viitattu 29.4.2020]. Saatavissa: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/con-tent/info/sahatavaran-jatkojalosteet/K%C3%A4ytt%C3%B6turvallisuus-ohje_Kestopuu.pdf

Kestopuuteollisuus ry. 2021a. Verkkosivut. [Viitattu 4.6.2020]. Saatavissa: <https://www.kestopuu.fi/>

Kestopuuteollisuus ry. 2021b. Tuotantotilasto. [Viitattu 3.6.2021]. Saatavissa: https://www.kestopuu.fi/media/kestopuuteollisuus-ry/tk_liite2.pdf

Laine-Ylijoki, J, Syrjä, J-J & Wahlström, M. 2003. Röntgenfluoresenssimenetelmät kierrätyspolttoaineiden pikalaadunvalvonnassa. VTT Tiedotteita 2215. [Viitattu 10.6.2021] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2215.pdf>

Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. [Viitattu 4.7.2020]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#L20P154>

Mancini, M & Rinnan, Å. 2021. Near infrared technique as a tool for the rapid assessment of wastewood quality for energy applications. Renewable Energy. 177:113-123.

Perälä, A-L & Nippala, E. 1998 Rakentamisen jätteet ja niiden hyötykäyttö. VTT tiedotteita 1936. [Viitattu 3.6.2021] Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/1998/T1936.pdf>

Pigorsch, E, Gärtner, G, Holstein, F & Meinschmidt, P. 2014. Sorting of Waste Wood by NIR Imaging Techniques. [Viitattu 17.6.2021] Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/279881762_Sorting_of_Waste_Wood_by_NIR_Imaging_Techniques

RAKSU (Rakennusalan suhdanneryhmä). 2020. Rakentaminen 2020–2021. Valtiovarainministeriö. Julkaisu 2020:63. [Viitattu 23.6.2021] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-367-303-8>

RT 21-11287. 2017. Kyllästetty puutavara. RT-ohjekortti. Rakennustieto Oy. Helsinki. 4 s.

Siuvatti, T. 2017. Kuinka XRF-analysaattori toimii? Holger Hartmann Oy. [Viitattu 10.6.2021]. Saatavissa: <https://www.holgerhartmann.fi/blogi/kuinka-xrf-analysaattori-toimii>

SIT 32-610076. 2010. Puiet ja puupohjaiset väliovet. SIT-ohjekortti. Rakennustieto Oy. Helsinki. 9 s.

Tilastokeskus. 2019. Korjausrakentaminen 2018. [Viitattu 11.6.2021]. Saatavissa: https://tilastokeskus.fi/til/kora/2018/03/kora_2018_03_2019-12-11_tie_001_fi.html

Tilastokeskus. 2020a. Jätteiden synty toimialoittain 2018. [Viitattu 4.6.2021]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/jate/2018/jate_2018_2020-06-17_tau_001_fi.html

Tilastokeskus. 2020b. Teollisuustuotanto 2019. [Viitattu 14.1.2021]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/tti/2019/tti_2019_2020-07-02_tie_001_fi.html

Tukes. 2018. Arseenilla käsitellyn puutavaran käyttörajoitusten soveltaminen. [Viitattu 13.6.2020]. Saatavissa: <https://tukes.fi/documents/5470659/6372697/Arseenilla+k%C3%A4sitellyn+puutavaran+k%C3%A4ytt%C3%B6rajoitukset/2a2e376b-a5b6-4c81-b2d5-4306bf7b38de/Arseenilla+k%C3%A4sitellyn+puutavaran+k%C3%A4ytt%C3%B6rajoitukset.pdf>

Tukes. 2020a. Arseenin käytön rajoitukset. Arseenilla kyllästetyn puun uusiokäyttö vain ammattimaisesti. [Viitattu 13.6.2020]. Saatavissa: <https://tukes.fi/kemikaalit/biosidit/biosidien-turvallinen-ja-kestava-kaytto/arseenin-kayton-rajoitukset>

Tukes. 2020b. Kreosootin käytön rajoitukset. [Viitattu 29.4.2020]. Saatavissa: <https://tukes.fi/kemikaalit/biosidit/kreosootin-kayton-rajoitukset>

Tukes. 2020c. Kyllästetty puun käytön rajoitukset. [Viitattu 29.4.2020]. Saatavissa: <https://tukes.fi/kemikaalit/biosidit/biosidien-turvallinen-ja-kestava-kaytto/kyllastetty-puun-kayton-rajoitukset>

Työterveyslaitos. 2017. OVA-ohje: Arseenipitoiset suolakyllästeet. [Viitattu 20.10.2021]. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/ova/ccakyll.html>

Tähkälä, T. 2015. Kyllästetyn puun kerääminen ja hyödyntäminen. Puujätteet kierrätykseen – seminaari 27.5.2015, Helsinki. [Viitattu 21.2.2020]. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7BE34393FD-E583-4254-9183-C09A8D35A1E5%7D/109394>

Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta 205/2009. [Viitattu 10.7.2020]. Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090205#Lidp446110880>

Viitanen, H. 2008. Puutavaran kestävyys ja valinta. Rakennustieto Oy. Helsinki. [Viitattu: 23.5.2021]. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK080401.pdf>

Ympäristö. 2020. Jätteiden vienti- ja tuontimäärät Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. [Viitattu: 8.5.2020]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Jatetilastot/Jatteen_vienti_ja_tuontimaarat

Ympäristöministeriö. 2020. Kestävän purkamisen green deal -sopimus. [Viitattu 28.6.2020]. Saatavissa: https://sitoumus2050.fi/documents/20143/428684/Purkaminen_green_deal.pdf/1c7db033-8e37-3ef3-cfdc-10ecff4232ec

Ympäristönsuojelulaki 527/2014. [Viitattu 8.7.2020]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527#L1P2>



Ympäristöministeriö
Miljöministeriet
Ministry of the Environment