



KIERTOPUU – PUUPAKKAUSTEN JA PUUTUOTETEOLLISUUDEN SIVUVIRTOJEN KIERRÄTYS- MAHDOLLISUUDET

Hannu Turunen & Lasse Hämäläinen (toim.)



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Hannu Turunen & Lasse Hämäläinen (toim.)

KIERTOPUU

– puupakkausten ja
puutuoteteollisuuden
sivuvirtojen
kierrätysmahdollisuudet



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Aalto-yliopisto



Etelä-Savon
maakuntaliitto

Vipuvoimaa

EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

XAMK KEHITTÄÄ 182

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU
MIKKELI 2021

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kannen kuva: Manu Eloaho

Taitto ja paino: Grano Oy

ISBN: 978-952-344-407-2 (PDF)

ISSN: 2489-3102 (verkko)

julkaisut@xamk.fi

LUKIJALLE

Kiertopuu – Puupakkausten ja puutuoteteollisuuden sivuvirtojen kierrätysmahdollisuudet -hanke (A74532) on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusalan ja Aalto-yliopiston yhteishanke. Hanketta rahoitti Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta, Metsäsairila Oy, Isku-Yhtymä Oy ja Puupakkausten Kierrätys PPK Oy.

Hanke toteutettiin aikavälillä 1.1.2019–31.12.2021. Hankkeen projektipäällikkönä toimi DI Hannu Turunen, tutkimusinsinööriä ins. (AMK) Lasse Hämäläinen ja ins. (AMK) Tuomas Venäläinen. Aalto-yliopiston osiosta vastasi apulaisprofessori Lauri Rautkari. Kiertopuu-hankkeen vastuullisena johtajana toimi tutkimusjohtaja, FT Lasse Pulkkinen, hankkeen yhteyshenkilönä tutkimuspäällikkö, Tkt Hanne Soininen ja hankeasiantuntijana Hanna-Maija Penttinen.

Hankkeen etenemistä ohjasi ja valvoi ohjausryhmä, johon kuuluivat laatu- ja ympäristöjohtaja Hanna Eskola ja vastuullisuusjohtaja Kaisa Vuori (Isku-Yhtymä Oy), toimitusjohtaja Jukka Ala-Viikari (Puupakkausten Kierrätys PPK Oy), johtaja Heikki Sonninen (Torrec Oy), toimitusjohtaja Sami Hirvonen ja toimitusjohtaja Ville Kakkonen (Metsäsairila Oy), tohtorikoulutettava Nina Kokkonen (Aalto-yliopisto) ja tutkimuspäällikkö Hanne Soininen (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu). Hankkeen ohjausryhmässä rahoittajan edustajana toimi ympäristöpäällikkö Sanna Poutamo Etelä-Savon maakuntaliitosta.

Tekijät kiittävät hankkeen rahoittajia kehittämistyön mahdollistamisesta sekä muita hankkeen toteutukseen osallistuneita tahoja osallistumisesta hanketyöhön.

Mikkelissä 22.12.2021.

KIRJOITTAJAT

JONNE GRÅSTEN, FM, kehityspäällikkö

Metsäsairila Oy

LASSE HÄMÄLÄINEN, ins. (AMK), tutkimusinsinööri

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

MAIJA KYMÄLÄINEN, FT, akatemian tutkijatohtori

Aalto-yliopisto

SOILI NOUSIAINEN, ins. (AMK), projekti-insinööri

Metsäsairila Oy

HANNE SOININEN, TkT, tutkimuspäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

HANNU TURUNEN, DI, projektipäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

MIKKO VALKONEN, DI, tohtorikoulutettavana

Aalto-yliopisto

TUOMAS VENÄLÄINEN, ins. (AMK), tutkimusinsinööri

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

SISÄLTÖ

LUKIJALLE.....	3
KIRJOITTAJAT	4
PUUPAKKAUSTEN JA PUUTUOTETEOLLISUUDEN SIVUVIRTOJEN KIERRÄTYSMAHDOLLISUUDET.....	6
Hannu Turunen & Maija Kymäläinen & Hanne Soininen	
KIERRÄTYSJAKEIDEN LAADUN ANALYSOINTI JA HYÖDYNTÄMISVAIHTOEHTOJEN SELVITTÄMINEN	8
Lasse Hämäläinen & Soili Nousiainen & Jonne Gråsten	
KIERRÄTYSSKENAARIOT – KÄYTÄNNÖN TESTIT	16
Hannu Turunen & Tuomas Venäläinen & Lasse Hämäläinen	
INNOVATIIVISET HYÖDYNTÄMISVAIHTOEHDOT	36
Mikko Valkonen & Lasse Hämäläinen & Hannu Turunen & Tuomas Venäläinen	

PUUPAKKAUSTEN JA PUUTUOTETEOLLISUUDEN SIVUVIRTOJEN KIERRÄTYSMAHDOLLISUUDET

Hannu Turunen & Maija Kymäläinen & Hanne Soininen

Kiertopuu – Puupakkausten ja puutuoteteollisuuden sivuvirtojen kierrätysmahdollisuudet -hanke (A74532) on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusalan ja Aalto-yliopiston yhteishanke. Hanketta rahoitti Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta, Metsäsairila Oy, Isku-Yhtymä Oy ja Puupakkausten Kierrätys PPK Oy. Hankkeen toimintaan osallistui myös Torrec Oy ja Kemion Oy. Kiertopuu-hankkeen tavoitteena oli selvittää puupohjaisten materiaalien kierrätyksen haasteita ja toiminnan nykytilaa sekä kehittää olemassa olevaa toimintaa.

Pitkien kuljetusetäisyyksien ja rajattujen markkinoiden takia Suomessa yli 90 % puujätteestä päätyy energiakäyttöön. Energiانا käyttäminen poikkeaa kuitenkin jätehierarkiasta, jossa tuotteelle tulisi ensisijaisesti löytää kierrätyskohde sen sisältämän hiilivaraston maksimoimisen tähden. Poikkeaminen hierarkiasta on mahdollista, mutta se tulee perustella kattavasti elinkaarilaskelmin. Myös puutuoteteollisuudessa jätteen kuljettaminen koetaan ongelmaksi. Pölypuru on laatunsa takia hankalaa käsitellä ja sen kuljettaminen on hyvin kustannustehotonta. Vaarana on, että puru muuttuu ongelmajätteeksi ja tuottajan on maksettava sen polttamisesta. Lisäksi pakkauksien ja kokopuisen jätteen ja jalosteiden (esim. levyपालat) polttaminen on ilmastonäkökulmasta epäedullista, sillä materiaalin jalostusarvon ja hiilivaraston tähden olisi kannattavaa pitää se kierrossa mahdollisimman pitkään. Kustannusten, mutta myös hiilijalanjäljen tähden olisi kannattavaa löytää siis myös teollisuudessa syntyville jätevirroille korvaavaa käyttöä.

Kierrätetyn puun mahdollisuuksia on tutkittu Suomessa vain vähän. Kansainvälinen paine materiaalitehokkuuden lisäämiseksi ja kansalliset kiertotalouden tavoitteet puoltavat voimakkaasti aiheeseen liittyvää tutkimusta. On tärkeää selvittää, mitä mahdollisuuksia meillä on puun kierrättämiseen ja minkälaisia tuotteita jätepuusta voitaisiin valmistaa. Hankkeessa tutkittiin sekä puupakkaus- että puutuoteteollisuuden jätevirtoja, jotta niiden potentiaali saataisiin selvitettyä mahdollisimman kattavasti. Tarkoituksena oli myös kehittää kierrätetystä puutavarasta valmistettuja tuotteita, jotta materiaaleja saataisiin kierrätettyä energiakäytön sijaan.

Kiertopuu-projekti tutki Suomessa syntyvän puujätteen ominaisuuksia ja selvitti mahdollisia väyliä sen jatkojalostukselle. Projekti loi katsauksen erilaisiin puupohjaisiin jätevirtoihin ja toi tietoa niiden laadusta ja käsittelyn ja jatkojalostamisen haasteista sekä puupakkausten että puutuoteteollisuuden näkökulmasta. Kokonaispäästöjen kannalta on edullista pitää sidottu hiili kierrossa mahdollisimman pitkään ennen polttoa, mutta siitä huolimatta selvitettiin myös materiaalien vaihtoehtoja käyttöä energiana. Näin tarjotaan perustelut jätehierarkiasta poikkeamiselle, jos energiakäyttö todetaan kokonaisvaikutusten kannalta paremmaksi vaihtoehdoksi.

Hankkeen toimenpiteet jaettiin viiteen työpakettiin (TP) ja työnjaosta sovittiin osatoteuttajien kesken. Aalto-yliopisto vastasi pääosin työpaketista 3, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoululla oli päävastuu työpaketista 1. Työpaketeista 2, 4 ja 5 vastasivat Aalto ja Xamk yhdessä. Työpaketit ja niihin sisältyneet työt on esitetty taulukossa 1. Koronaviruksen aiheuttaman pandemian johdosta hankkeelle anottiin ja saatiin jatkoaikaa vuoden 2021 loppuun.

Taulukko 1. Työpakettien sisältö

Työpaketti	Sisältö
Työpaketti 1 Kierrätysjakeiden (A- ja B-luokka) laadun analysointi ja hyödyntämismavaihtoehtojen selvittäminen	Palakoko, irtotiheys, muovi-, alkuaine-, kuiva-aine-, kosteus- ja tuhkapitoisuus. Kalorimetrinen lämpöarvo ja tehollinen lämpöarvo.
Työpaketti 2 Kierrätyskenaarioiden käytännön testit	Puubetoni Levymäiset tuotteet Puumuovikomposiitit
Työpaketti 3 Ympäristövaikutusten arviointi	Life Cycle Analysis (LCA) Pohjatietojen kerääminen ja laskentaa
Työpaketti 4 Innovatiiviset hyödyntämismavaihtoehdot	Liukkaudentorjuntamurske Akustiikkalevyt Biohiili
Työpaketti 5 Raportointi ja tulosten levittäminen	Kokoukset, seminaarit, julkaisut

KIERRÄTYSJAKEIDEN LAADUN ANALYSOINTI JA HYÖDYNTÄMIS-VAIHTOEHTOJEN SELVITTÄMINEN

Lasse Hämäläinen & Soili Nousiainen & Jonne Gråsten

Hankkeessa selvitettiin A- ja B-luokan puutavaran kierrätysjakeiden laatua (kuva 1). Selvitys tehtiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ympäristölaboratoriossa. Kierrätysjakeiden laatua analysoitiin yhteistyökumppaneilta satunnaisotannalla saaduista A-, B- ja C-luokan jakeista. Murskatuista kierrätysjakeista analysoitiin palakoko, irtotiheys, muovi-, metalli-, kuiva-aine-, kosteus- ja tuhkapitoisuus, kalorimetrinen lämpöarvo, tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa ja saapumistilassa sekä hiili-, vety-, natrium- ja rikki-pitoisuus. Näytteistä analysoitiin myös Cl-, K-, Al-, As-, Cd-, Cr-, Cu-, Hg-, Pb-, Zn- ja Ba-pitoisuudet. Kierrätyistä hankaloittavien aineiden, kuten metallien ja muovin määrien selvittäminen perustui visuaaliseen havainnointiin.



KUVA 1. Puujätettä ja siitä valmistettua energiamurskettä Metsäsairilassa (kuva: Hannu Turunen).

PUUJÄTTEEN KÄSITTELYYN LIITTYVÄ LAINSÄÄDÄNTÖ JA PUUMATERIAALIN KIERRÄTYS

Puujätteen kierrätyksessä sovelletaan Euroopan parlamentin ja neuvoston jättepuitedirektiiviä 2008/98/EY. Direktiivin 4 artikla määrittelee jätehierarkian, jolla pyritään vähentämään jätteen syntyä. Hierarkian toteuttamisjärjestys:

- a) ehkäiseminen
- b) valmistelu uudelleenkäyttöön
- c) kierrätys
- d) muu hyödyntäminen, esimerkiksi energiana
- e) loppukäsittely.

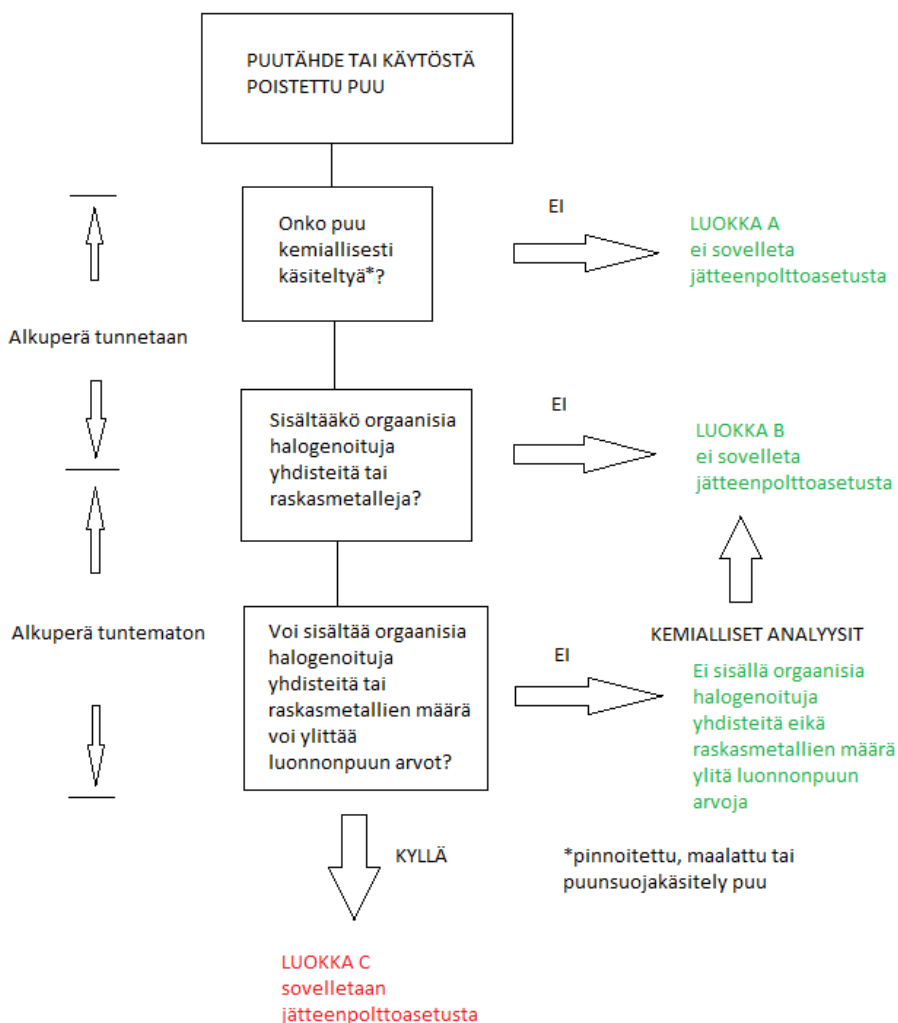
Jätehierarkiaa sovellettaessa jäsenvaltioiden on toteutettava toimenpiteitä, joilla päästään ympäristön kannalta parhaaseen mahdolliseen kokonaistulokseen. Yksittäisten jätevirtojen osalta hierarkiasta voidaan poiketa, jos se on elinkaariajattelun mukaisesti perusteltua.

Puujätteisiin luetaan tuottajavastuun piirissä olevat rakennus- ja purkujätteet sekä puinen pakkausjäte. Suomessa syntyy vuosittain noin 3,4 miljoonaa tonnia puujätettä, suurin osa teollisuudessa. Puisen rakennus- ja purkujätteen osuus kokonaismäärästä on alle 200 000 tonnia ja puupakkausjätteen hieman yli 200 000 tonnia.

Puupakkausten kierrätystavoite on 17 prosenttia, ja tämä on saavutettu kuormalavoja korjaamalla sekä kierrättämällä puumateriaalia kompostien tukiaineeksi. Lähitulevaisuudessa puupakkausten kierrätystavoitteet nousevat rajusti ja uusia kierrätystapoja on pakko keksiä. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2018/852 uudeksi kierrätystavoitteeksi on asetettu 25 prosenttia vuoteen 2025 mennessä ja 30 prosenttia vuoteen 2030 mennessä.

PUUJÄTTEEN LUOKITTELU

Käytöstä poistettu puu luokitellaan A-D-luokkaan (kuva 2). Hankkeessa keskityttiin vain puhtaimpiin jakeisiin, eli A- ja B- luokkiin, koska niiden kierrätysmahdollisuudet ovat suuremmat kuin C- ja D-luokan puujätteellä. A-luokan materiaali on puhdasta (mekaaniset epäpuhtaudet sallitaan) ja B-luokan puu kemiallisesti käsiteltyä (ilman halogenoituja orgaanisia yhdisteitä ja raskasmetalleja). Luokkiin A ja B lasketaan siis muun muassa luonnonpuu, kuormalavat ja muut puupakkaukset, erilaiset puutähteet sekä huonekalut.



KUVA 2. Puujätteen luokittelu (mukaillen VTT 2014).

KÄYTÖSTÄ POISTETUN PUUN KIERRÄTYS (A- JA B-LUOKKA)

Pakkajäte koostuu pääasiassa käsittelemättömästä puusta, mutta se voi sisältää puriste-puisia välipaloja, nauvoja, maalia, puunsuoja-aineita ja liimoja. Puupakkauksiin lasketaan kuormalavojen lisäksi erilaiset alustat, kehikot, laatikot, kaapelikelat, tynnyrit ja tuki- ja välipuut. Puupakkajäte on lähtökohtaisesti B-luokan jättepuuta, mikäli pakkaukset eivät ole joko tuholaiistorjuntakäsiteltyjä tai kemiallisesti likaantuneita käytön aikana niillä kuljetettavista materiaaleista. Kokonaan käsittelemättömästä puusta valmistetut puhtaat puupakkaukset, kuten kertakäyttölavat, voidaan laskea kuuluvaksi luokkaan A.

Puukomposiitin valmistamiseen käytetään useimmiten muoviyhdisteitä (HD-PE, PP) sekä pieniä määriä tuotteen laatua ja kestävyyttä parantavia kemikaaleja, kuten UV-suoja-ainetta. Komposiitin valmistamisessa käytettävä muovi sekä puu voivat olla kierrätysmateriaalia. Puukomposiittia valmistamalla saadaan siis kahta erilaista jätteä jatkokäyttöön ennen polttolaitoksille ohjaamista. VTT on tuottanut prototyyppejä ja kehittää jatkuvasti ligniinipohjaista puukomposiittia. Ligniinin käyttö muovin korvaajana lisää materiaalin ympäristöystävällisyyttä ja vähentää mahdollisten haitta-aineiden määrää lopputuotteessa.

KIERRÄTYSPUUNÄYTTEIDEN ANALYYSIT

Kiertopuu-hankkeessa suoritettiin haitta-aineanalyyskejä erilaisista A- ja B-luokan puujättejakeista. Näytteistä puhdasta puuta edustaa rankahake. Kuormalavamurske valmistettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Puupolilla käytöstä poistetuista lavoista. Lavoista poistettiin naulat sekä välituet, eli murske valmistettiin pohja- ja kansilautoista. Betonivalumuottinäyte valmistettiin tietyömaalta noudetuista sillan betonivalumuotin laudoista. Lajittelematonta puujätettä noudettiin Metsäsairila Oy:n puujätteen keräyspisteeltä. Näytteet lähetettiin analysoitavaksi Eurofins Labtium Oy:n laboratorioon Jyväskylään.

VTT:n vuonna 2007 julkaisemassa tiedotteessa vertailtiin kierrätetyn puun haitta-ainepitoisuuksia puhtaaseen puuhun (taulukko 1). Tutkimuksen tuloksia on verrattu hankkeessa suoritettujen puujätteenanalyysien tuloksiin. VTT:n tutkimuksessa kierrätyspuuhake valmistettiin pääosin rakennuspuujätteestä, puhtaan puun vertailuarvoina on käytetty tyyppillisten pitoisuuksien vaihteluvälin ylärajan arvoja.

TAULUKKO 1. Puujätteenanalyysien tulokset verrattuna VTT:n tutkimukseen.

	Rankahake	Kuormalavamurske	Lajittelematon puujäte	Betonivalumuotti	Puhdas puu (VTT)	Kierrätyspuuhake (VTT)	
Na+K	731	3 138	2 190	890	1 100	2 200	mg/kg, d
Al	19	<10	1900	650			mg/kg, d
As	2,4	2,8	8	0,97	1	18	mg/kg, d
Ba	21	11	150	17			mg/kg, d
Cd	0,09	0,04	0,18	0,02	0,5	0,5	mg/kg, d
Cr	2,4	1,5	30	9	10	60	mg/kg, d
Cu	1,7	1,1	12	2,6	10	80	mg/kg, d
Hg	<0,02	<0,02	0,08	0,03	0,05	0,05	mg/kg, d
Pb	<0,5	<0,5	39	0,61	10	76	mg/kg, d
Zn	23	9,2	250	9,2	100	300	mg/kg, d
Mn			87		100	100	mg/kg, d
N	0,21 %	0,17 %	0,89 %	0,17 %	0,50 %	0,68 %	
Cl	0,003 %	0,003 %	0,17 %	0,002 %	0,03 %	0,12 %	
S	0,007 %	0,005 %	0,075 %	0,015 %	0,05 %	0,08 %	

Analyysissä ainoastaan lajittelematon puujäte ylitti puhtaan luonnonpuun vertailuarvot usean haitta-aineen kohdalla. Kuormalavamurskenäytteestä löytyi korkeita kaliumpitoisuuksia.

Haitta-aineiden lisäksi ISKU:n ja Metsäsairilan jätepuunäytteistä määritettiin kosteusprosentti sekä tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (taulukko 2). Jätepuunäytteiden lisäksi analyysiin otettiin mukaan puhtaasta mäntylaudasta sekä lämpökäsitellystä mäntylaudasta valmistettua puumursketta.

TAULUKKO 2. Tehollinen lämpöarvo sekä kosteusprosentti saapumistilassa.

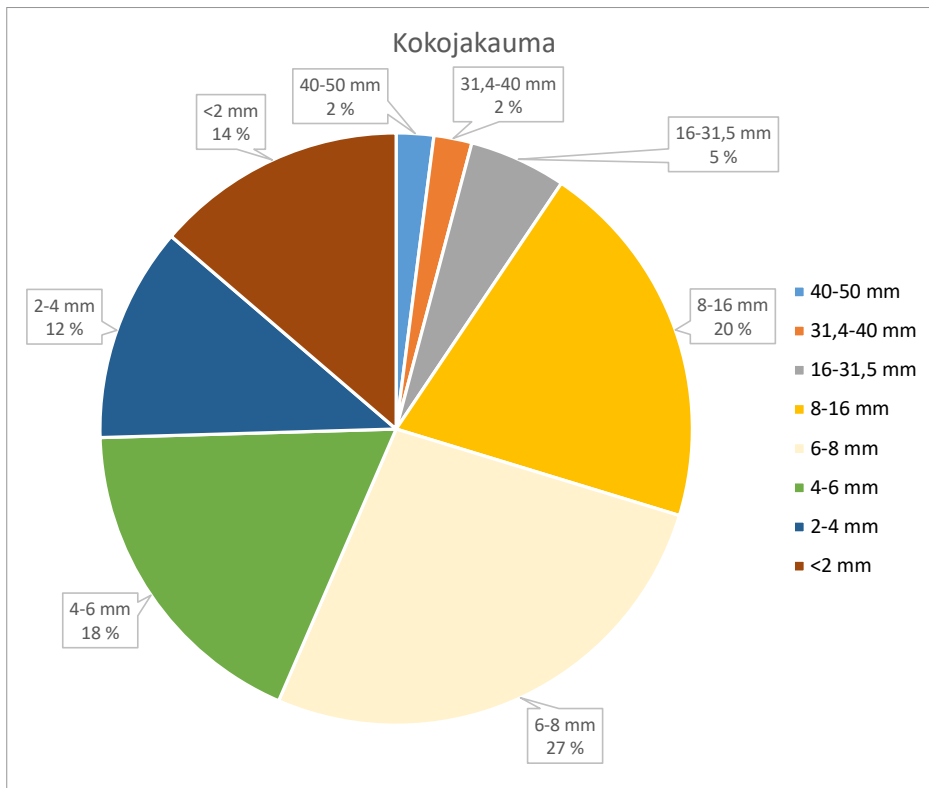
	Kosteusprosentti saapumistilassa %	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg
ISKU	6,11	19,15
Metsäsairila	28,20	19,96
Lämpökäsitelty mäntylauta	4,61	20,96
Puhdas mäntylauta	7,55	21,74

Näytteiden lämpöarvot ovat verraten puhtaan puupolttoaineen luokkaa, 16–24 MJ/kg riippuen puulajista ja rungon osasta (VTT 2016). Metsäsairilan jätepuunäytteen lämpöarvoa laskee korkea kosteuspitoisuus saapumistilassa. Puujäte säilötään ulkona kasoissa ennen kuljetusta polttolaitokseen, jolloin jätepuunäytteen kosteuspitoisuus riippuu vahvasti näytteenottohetkellä vallinneista sääolosuhteista.

Metsäsairilan jätepuunäytteistä määritettiin kokojakauma (taulukko 3) sekä vierasaineiden osuus Xamkin ympäristölaboratoriolla. Metsäsairilan näyte otettiin murskatusta sekä kahdesti seulotusta puujättekasasta, joten vierasaineiden määrän tiedettiin olevan pienempi kuin jätteen saapumistilassa. Kokojakauman määrittämisessä käytettiin noin 20 litraa kuivattua puujätettä. Näytteiden seulonta suoritettiin standardia SFS-EN ISO 17827-1 mukaillen.

TAULUKKO 3. Näytteiden kokojakauma.

	Jakeen massa g	Prosentuaalinen kokojakauma
40–50 mm	55	2,0 %
31,4–40 mm	55,9	2,1 %
16–31,5 mm	142,8	5,3 %
8–16 mm	546,7	20,3 %
6–8 mm	721,1	26,8 %
4–6 mm	486,1	18,0 %
2–4 mm	316,1	11,7 %
<2 mm	369,6	13,7 %
Kaikki jakeet yhteensä	2 693,3	100,0 %



KUVA 3. Kahdesti seulotun Metsäsairila Oy:n puujätenäytteen kokojakauma.

Puujäte sisälsi todella vähän vierasaineita. Kahden seulonnan jälkeen 6 litran puujätenäytteestä löytyi alle 50 g vierasaineita (taulukko 4), mm. metallia, muovia, kangasta sekä lasia. Vierasaineita oli näytteessä siis alle 4 massaprosenttia (taulukko 5).

TAULUKKO 4. Näytteen vierasaineiden määrä.

Vierasaine	Massa (g)
Muovi	12,5
Lasi	2,4
Metalli	28,4
Kangas	3,0
Yhteensä	46,3

Näytteen irtotiheys määritettiin standardia SFS-EN ISO 17828:2015 mukailleen. Määrittelyyn käytettiin standardista poiketen 2 litran astiaa.

TAULUKKO 5. Näytteen irtotiheys.

Näyte	Irtotiheys
Astia 1 (kuiva)	308,1 g
Astia 2 (kuiva)	295,6 g
Astia 3 (kuiva)	336,8 g
Yhteensä	940,5 g
Irtotiheys, kuiva	156,75 g/l
Irtotiheys saapumistilassa	200,95 g/l

Puujätteen kierrätykselle haasteita asettaa jätteen sisältämät haitta-aineet, materiaalin epä-salaatuinen koostumus sekä pitkät välimatkat jätteen synty- ja kierrätyspaikan välillä. Jotta puujätteen kierrätykselle asetetut tavoitteet saadaan täytettyä, tulee nykyisiä lajittelu- sekä kierrätysmenetelmiä kehittää. Puujätteen uusiokäytössä tulee kiinnittää huomiota jätteen ympäristö- ja terveysvaikutuksiin, varsinkin jos käyttökohde sijaitsee asutus- tai pohjavesialueella. Puujätteen kierrätyskohteen pitäisi olla myös riittävän suuri, jotta jätemassaa saataisiin merkittävässä määrin kierrätettyä.

A- ja B-luokan jätteelle tulisi löytää omat kierrätysmenetelmät, jotka ovat teollisessa mitakaavassa järkeviä ja kustannustehokkaita. B-luokan puujätteessä materiaalin sisältämät liima-, kemikaali- sekä maalijäämät rajoittavat uusiokäyttöä. A-luokan puussa haasteena on materiaalin laadunvarmistus, esimerkiksi käytetty kuormalava on huomattavan erilaista harvennushakkuiden risuihin verrattuna. Parhaassa tapauksessa puujätteellä pystyttäisiin korvaamaan neitseellistä puuraaka-ainetta jossakin teollisuuden prosessissa, lähellä puujätteen syntypaikkaa. Tällöin päästöjen määrä vähenisi sekä puuntuotantoketjun että puujätteen kierrätyksen osalta. Neitseellisen puuraaka-aineen halpa hinta vähentää teollisten toimijoiden kiinnostusta kierrätyspuun käyttöön, koska jätteen halvempi hinta ei korvaa sen käsittelykuluja tuotantoprosessissa tasalaatuisuuden takaamiseksi. Tuotteiden valmistajat käyttävät mieluummin tasalaatuista ja puhdasta puuta, jonka työstäminen ja tuotantoprosessin automatisointi on helpompaa.

LÄHTEET

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY. 2008.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/852.

VTT. 2007. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuudet ja käyttö. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2416.pdf>

VTT. 2014. Käytöstä poistetun puun luokittelun soveltaminen käytäntöön – VTT-M-01931-14. Saatavissa: https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2020/03/Kaytosta_poistetun_puun-soveltamisohje_Lokakuu2014.pdf

VTT. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>

KIERRÄTYSKENAARIOT – KÄYTÄNNÖN TESTIT

Hannu Turunen & Tuomas Venäläinen & Lasse Hämäläinen

Kierrätyskenaarioissa pääpaino oli kokeiluluontoisessa tuotevalmistuksessa. Tarkoituksena oli testata, kuinka kierrätysjakeita voitaisiin hyödyntää erilaisten tuotteiden valmistuksessa. Tuoteskenaarioiden valmistuksessa käytettiin A- ja B-luokan kierrätyspuujakeita. Tuoteskenaarioiksi valittiin puubetonituotteet, levy- ja muotopuristeet sekä puumuovikomposiittivalut.

Puubetonituotteiden valut tehtiin Xamkin Puutekniikan laboratoriossa Mikkeliissä. Puubetonivaluina tehtiin useita standardin SFS-EN 12390-3:2019 mukaisia puristuslujuuskoekappaleita, penkkejä sekä kaksi kappaletta skeittipenkkejä. Puristuslujuuskoekappaleita testattiin Xamkin Kotkan kampuksen akreditoitussa betonilaboratoriossa. Penkit ovat olleet koekäytössä Mikkelin Puulaboratoriolla, toinen sisätiloissa ja toinen ulkoilmalle alttiina. Skeittipenkit toimitettiin koekäyttöön Mikkelin Rullalautailijoiden DIY-skeittihallille.

Levytuotteita valmistettiin Puulaboratoriossa Mikkeliissä. Levytuotteiden valmistaminen aloitettiin pienessä, 15 386 mm²:n mittakaavassa, jonka jälkeen kappaleiden kokoa skaalattiin suuremmiksi, 95 000 mm²:n kokoon asti. Kappaleiden koon kasvattamista rajoitti vaatimus riittävästä puristusaineesta. Puristusaineen tavoitearvo suuremmille koelevyille määräytyi pienen mittakaavan kokeilun perusteella. Pienen mittakaavan testeillä haarukoitiin prosessiparametrejä, joilla kappaleet saatiin onnistumaan halutunlaisesti. Levytuotteita valmistettiin sekä kirkkaasta että lämpökäsitellystä puumateriaalista valmistetusta murskeesta. Lisäksi raaka-aineina kokeiltiin puhtaasta puusta valmistettua kutteripurua sekä Metsä-airilasta noudettua energiajajamursketta. Levytuotteiden valmistaminen vaati puristimien modifiointia ja muottien rakentamista. Pienemässä koepuristimessa oli modifoinnin jälkeen mahdollista lämmittää ja jäädyttää muottia. Lämmittäminen toteutettiin sähkövastuksien avulla ja jäädyttäminen verkostovedellä. Suurempaan puristimeen rakennutettiin vastavainlainen lämmitysmahdollisuus, mutta laitteistossa ei ollut mahdollisuutta jäädytykseen. Jäähdytysmahdollisuus osoittautui erittäin hyödylliseksi varsinkin, kun puristuslämpötila oli yli 100 celsiusastetta. Kun käytettiin korkeaa puristuslämpötilaa, oli puristusjakson jälkeen odotettava muotin jäähtymistä tai käytettävä jäähdytystä, jotta kappaleessa oleva vesihöyry ei rikkoo kappaletta tai vaurioitaisi sen pintaa. Korkeasta lämpötilasta, paineesta ja kappaleissa olevasta kosteudesta oli hyötyä, sillä tietyillä parametreillä murskeet saatiin liimautumaan toisiinsa kiinni.

Puumuovikomposiittikappaleihin liittyvät työt alkoivat raaka-aineiden ja ruiskuvalugranulaattien valmistuksen selvittämisellä. Selvitystyön pohjalta kierrätyspuumateriaaliksi valikoitui Isku Oy:n toimittama puupöly, matriisiaineeksi biohajoava PLA-muovi (polylaktidi) ja granulaattien valmistajaksi Elastopoli Oy Sastamalasta. Granulaattien raaka-aineeksi valittua Isku Oy:n toimittamaa puupölyä/-mursketta jauhettiin Xamkin Ympäristöteknologian laboratoriossa, jotta pölyn/murskeen koko saatiin vastaamaan Elastopoli Oy:n tuotannon vaatimuksia. Puumuovikomposiittien valmistuksessa ja testaamisessa hyödynnettiin Xamkin Puulaboration sekä Materiaalitekniikan laboration laitteistoa, kuten ruiskuvalukonetta ja rasisuskehää.

PUUBETONIVALUT

Puumateriaalin kierrätyksen näkökulmasta puubetoni koettiin mielenkiintoiseksi tuotevaihtoehdoksi muun muassa jo olemassa olevan teollisen tuotannon takia. Kierrätysjätteiden käytön mahdollinen suurehko volyyymi puubetonituotteissa koettiin luonnollisesti positiiviseksi asiaksi.

Puubetonituotteiden valut tehtiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Puulaboratorion. Valujen tekemistä varten hankittiin 1 000 kg Fescon Korrobetoni K45 valmisbetonia sen pakkasenkesto-ominaisuuksien takia. Lisäksi hankittiin rauditusverkkoa, harjaterästä, rautaoksidipigmenttiä sekä natriumsilikaattiliuosta. Terästuotteita käytettiin penkkien sekä skeittipenkkien lujittamiseen ja rautaoksidia skeittipenkkien värjäämiseksi. Skeittipenkit pintakäsiteltiin natriumsilikaattiliuoksella pölynsitomista varten sekä pinnan kulutuksenkeston lisäämiseksi.

Puubetonituotteissa käytetty kierrätyspuujae valmistettiin käytetyistä kuormalavoista. Lavojen kansi- ja pohjalaudat katkottiin ketjusahalla noin 10 cm:n paloiksi ja palat murskattiin Xamkin Ympäristölaboration jätemurskaimella. Murskeen lavaraaka-aineet on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Mursketta valmistettiin lavoista (kuva: Hannu Turunen).

PURISTUSLUJUUSTESTIKAPPALEET SFS-EN 12390-3:2019

Standardin SFS-EN 12390-3:2019 mukaisten puristuslujuustestikappaleiden valmistaminen aloitettiin keväällä 2019. Standardin mukaiset puristuslujuustestit tehtiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kotkan kampuksella, akreditoitussa betonilaboratoriossa kesällä 2020. Standardi määrittää muun muassa puristuslujuustestissä käytettävien kappaleiden mitat. Testikappaleita valmistettiin sekä 100 x 100 x 100 mm:n sekä 150 x 150 x 150 mm:n kuutioina. Molemmista kuutioista on annettu esimerkki kuvassa 2. Puubetonivaluissa puumursketta oli kappaleen tilavuudesta noin 50 %. Referenssikappaleet oli valettu puhtaasta betonista. Valumuotit tehtiin filmivanerista, niiden nurkat tiivistettiin silikonilla ja irrotusaineena käytettiin rapsiöljyä.



KUVA 2. Puristuslujuusstandardin mukaisia puubetonivaluja (kuva: Hannu Turunen).

Sekä referenssi- että puubetonikappaleiden valaminen onnistui hyvin. Puubetonikappaleissa suurin haaste oli ilman saaminen pois kappaleista. Puubetonikappaleiden riittävä täryttäminen oli myös työläämpää kuin referenssikappaleiden. Kappaleiden täryttäminen tehtiin koputtelemalla muotien laitoja vasaroilla. Myös alipainesäkitys kokeiltiin. Alipainesäkityksessä toteutus ei onnistunut suunnitellusti. Alipainesäkki, muotti ja valupinta muodostivat väylän vedelle, joka poistuessaan kapillaarisesti otti mukaansa tuotteista myös sementtiä.

Näiden koekappaleiden puristuslujuuden arvot olivat arvattavasti testin alhaisimmat. Onnistuneiden puubetonikappaleiden puristuslujuuden arvot (Mpa) olivat testien mukaan vain noin 10 % referenssikappaleiden puristuslujuuksista, mutta suuren puumurskemäärän takia tulos ei ollut yllättävä. Testien tavoitteena oli yrittää valmistaa puubetonikappaleita, joissa puumurskeen osuus tuotteen tilavuudesta oli suuri ja siinä onnistuttiin. Suuren puumursketilavuuden sisältävien tuotteiden alhaisempi puristuslujuuden arvo tulee ottaa huomioon kappaleiden käyttökohteita suunniteltaessa.

TAULUKKO 1. Puubetoni ja referenssikappaleiden puristuslujuustestitulokset.

Tunnus	Max. kuorma (kN)	Muunnettu puristuslujuus K150 (Mpa)	Tiheys (kg/m ³)
19.4	43,3	4,2	1 360
19.5	47,6	4,6	1 390
19.6	79,9	7,7	1 450
19.1	175,9	7,8	1 450
19.2	171,1	7,6	1 450
19.3	100,3	4,5	1 350
20.4	58,3	5,7	1 490
20.5	52,7	5,0	1 450
20.6	67,7	6,6	1 540
20.1	132,9	5,9	1 490
20.2	144,8	6,4	1 530
20.3	138,3	6,1	1 480
Ref 1	936,2	41,6	2 090
Ref 2	975,8	43,4	2 080
Ref 3	356,2	34,3	2 080
Ref 4	370,2	35,9	2 090

PENKIT

Puubetonituotteiden suunnittelu aloitettiin alkukevällä 2019. Suunnittelun lähtökohdaksi valittiin tuote, jonka mekaaninen rasitus olisi vähäistä, sillä lähdemateriaaleihin perustuen puubetonituotteiden puristuslujuuden tiedettiin olevan alhainen. Tuotteeksi valikoitui penkki, ja niitä valmistettiin kaksi kappaletta. Penkit koostuvat kolmesta erillisestä osasta, jotka on liitetty kiinteästi toisiinsa. Penkin molemmat jalat valettiin samalla valukerralla kuvan 3 mukaisesti. Kannen tekemistä varten tehtiin oma puubetoniseos.



KUVA 3. Puubetonivalujen tekemistä (kuva: Hannu Turunen).

Kaikilla valukerroilla puun ja betonin seossuhteen resepti oli samanlainen. Puumurskeen tilavuus kaikissa puubetonipenkki-valuissa oli 50 % valettavan kappaleen tilavuudesta. Ilman poistamiseksi valuista kokeiltiin tärytystä vasaroilla sekä alipainesäkitystä. Alipainesäkitys on esitetty kuvassa 4.



KUVA 4. Ilmanpoisto alipainesäkitystä käyttäen (kuva: Hannu Turunen).

Molemmilla tavoilla päästiin haluttuun lopputulokseen. Kapilaarista veden ja sementin poistumista ei tapahtunut penkkien valuissa imuletkujen huolellisemman sijoittamisen ansiosta. Valujen kuivumisen jälkeen penkkien jalat kiinnitettiin kansiin betoniruuveilla ja injektiomassalla. Valmis penkki on esitetty kuvassa 5. Kasaamisen jälkeen toinen penkeistä siirrettiin pihalle, alttiiksi ulkoilmalle, ja toinen pidettiin Xamkin Puulaboratoriolla sisätiloissa.



KUVA 5. Valmis puubetonipenkki (kuva: Hannu Turunen).

SKEITTIPENKIT

Pinnan tasaisuuden takia betonia käytetään usein skeittipuistojen ja skeitattavien tuotteiden pintamateriaalina. Keväällä 2019 Hannu Turunen oli yhteydessä Maisema-arkkitehti Janne Saarioon. Janne on suunnitellut useita skeittipuistoja Suomessa ja ulkomailla sekä skeittielementtejä. Janne kiinnostui hankkeen kierrätysnäkökulmasta ja lupautui suunnittelemaan hankkeelle puubetonituotteen. Lopulta tuotteeksi muodostui puunväriseksi värjätty skeittipenkki. Ruskealla värillä oli tarkoitus korostaa skeittipenkkien rakenteessa olevaa puumursketta ja tuoda esiin kierrättämisen näkökulmaa myös loppukäyttäjille. Skeittipenkin teräksiset reunukset valmisti Haukivuorella sijaitseva Kospirt Oy. Valut toteutettiin Puulaboratoriolla ja valmiit penkit toimitettiin Mikkelin Rullalautailijoiden DIY-skeittihallille Mikkelin Rokkalan kaupunginosassa. Janne Saarion toimittamien piirustusten pohjalta skeittipenkeistä tehtiin ensiksi hahmomalli. Hahmomalli valmistettiin vanerista ja sahatavarasta. Mallin tarkoituksena oli havainnollistaa tuotteen kokoa sekä saada selvyyttä valujen toteuttamista varten. Skeittipenkin jalkojen muotit valmistettiin mäntysahatavarasta ja pohja filmivanerista, nurkat saumattiin silikonilla ja irrotusaineena käytettiin rypsiöljyä. Osittain avattu muotti näkyy kuvassa 6. Kannen valu tehtiin suoraan teräshekikon sisään kuvan 6 mukaisesti. Valun pohjana, eli penkin kannen muottipintana, teräshekikon alla käytettiin ensimmäisessä valussa melamiinipinnoitettua vaneria ja toisessa OSB-levyä. Irrotusaineena molemmissa oli rypsiöljy. Levyjen ja teräshekikon sauma tiivistettiin liimattavalla tiivistenauhalla. OSB-levystä oli tarkoitus peilata kuvio penkin kanteen. Kuvion toistaminen ei kuitenkaan onnistunut toivotulla tavalla.



KUVA 6. Vasemmalla puubetonimassaa muotissa ja oikealla jalan muotin avaaminen (kuva: Hannu Turunen).

Valut onnistuivat muuten hyvin, mutta penkin pinnan ja kehikon reunan saumaan tuli muutaman millimetrin korkuinen pykälä, niin että valupinta oli korkeammalla kuin teräskehikon reuna. Pykälän ajateltiin haittaavan skeittipenkkiä käyttäessä, joten kehitettiin käännettiin ympäri ja alapinnalle jääneeseen tyhjiin tilaan tehtiin uusi pintavalu itsetasoittuvalla massalla. Itsetasoittuvaan massaan ei lisätty puumursketta, sillä valun pinnasta haluttiin mahdollisimman tasainen. Itsetasoittuvalla massalla tehdyn valun paksuus oli toisessa penkissä noin 10 mm ja toisessa keskimäärin 15 mm. Valmis valupinta on kuvan 7 mukainen. Lopuksi pinnat käsiteltiin natriumsilikaatilla pölyämisen vähentämiseksi ja kulutuksen keston parantamiseksi.



KUVA 7. Itsetasoittuvalla massalla tehty pintavalu (kuva: Hannu Turunen).

Uuden pintavalun toteutustavasta johtuen skeittipenkkiä kannessa puumursketta oli noin 40 % ja betonipohjaisia tuotteita 60 %. Skeittipenkkiä jaloissa suhde oli 50 % puumursketta ja 50 % betonia. Siirtoa odottava, valmis skeittipenkki on esitetty kuvassa 8. Muutaman kuukauden koekäytön jälkeen käyttäjien kokemukset skeittipenkeistä ovat olleet positiivisia.



KUVA 8. Valmis skeittipenkki (kuva: Hannu Turunen).

LEVYMÄISET TUOTTEET JA MUOTOPURISTEET

Levyjäisiä tuotteita kehoiltiin valmistaa pelkästä A- ja B-luokan kierrätysjakeesta sekä A- ja B-luokan jakeista ja luonnollisista liima-aineista. Koelevyjien valmistaminen aloitettiin Xamkin Puulaboratoriolla kuvan 9 mukaisella laboratoriokokoluokan koepuristimella (Schwabenthan Polystat 200 S). Puristimen ylä- ja alatasot ovat lämmitettävät ja niiden pinta-ala on 250 mm x 250 mm. Lämmityksen lisäksi puristinlevyjä oli mahdollista jäähdyttää verkostovedellä.

Alustavat kokeilut tehtiin suoraan puristimien tasojen välissä. Koska alustavien kokeiden perusteella puristin vaikutti olevan käyttöön soveltuva, koelevyjien valmistamista varten rakennettiin muotti. Muotin yläpinta tehtiin teräksestä ja alaosa alumiinista. Muotin yläpainimen halkaisija on 145 mm. Alumiinisen alamuotin avulla murske saatiin pysymään halutun pinta-alan alueella. Teräksisellä ylämuotilla murskemassa puristettiin levyjäiseen muotoon. Muotin ylä- ja alaosa on esitetty kuvassa 10.



KUVA 9. Schwabenthan Polystat 200 S -koepuristin (kuva: Hannu Turunen).



KUVA 10. Muotin teräksinen yläpainin kuvassa vasemmalla ja alaosa kuvassa oikealla (kuva: Hannu Turunen).

Hankkeen kuluessa kyseisellä muotilla tehtiin 50 kpl koelevyjä. Koelevyjä valmistettiin useista eri kierrätysjakeista ja useilla erilaisilla seossuhteilla. Ensimmäisten koelevyjen avulla haarukoitiin soveltuvia puristusparametreja ja raaka-aineiden seossuhteita. Pää-asiaassa levyjä valmistettiin A- ja B-luokan kierrätysjakeista, mutta muutamia koepuristuksia tehtiin myös Metsäsairilasta noudetulla energijakeella. Osa puristeista valmistettiin viilupintaisina.

Testien alussa puristelevyjen valmistaminen oli hidasta, sillä muotin ja sen sisällä olevan puristeen piti antaa jäähtyä alle 100 °C:n lämpötilaan. Jos muotti avattiin yli 100 °C:n lämpötilassa, purkautuva höyrinpaine rikkoi puristeen tai aiheutti ainakin muodonmuutoksia kappaleeseen. Korkeasta puristelämpötilasta johtuen puristimen jäähdytysjärjestelmä päätettiin ottaa käyttöön levyjen valmistamisen nopeuttamiseksi. Laitteiston jäähdytys tapahtui verkostovedellä. Jäähdytysjärjestelmän käyttöönotto vaati komponenttien uusimista. Jäähdytys oli tehokas ja toi toivottua nopeutta levyjen valmistamiseen. Soveltuvien puristusparametrien haarukoinnin jälkeen puristamalla valmistettiin noin 50 kpl levyjä.

Osalle valmistetuista koelevyistä tehtiin soveltava dimensiostabiilisuustesti. Testissä kekehtiin kierrätysmateriaaleista sekä luonnollisista liima-aineista valmistettujen koelevyjen mittapysyvyyttä vaihtelevissa kosteus- ja lämpötilaolosuhteissa, soveltaen standardia EN 1910. Tasaantumassa olevia levyjä on esitetty kuvassa 11. Jokaisesta testiin valitusta levysarjasta testattiin kolme kappaletta. Levysarjojen reseptit ja valmistusparametrit on esitetty taulukossa 2.



KUVA 11. Koelevyjä tasaantumassa olosuhdehuoneessa (kuva: Hannu Turunen).



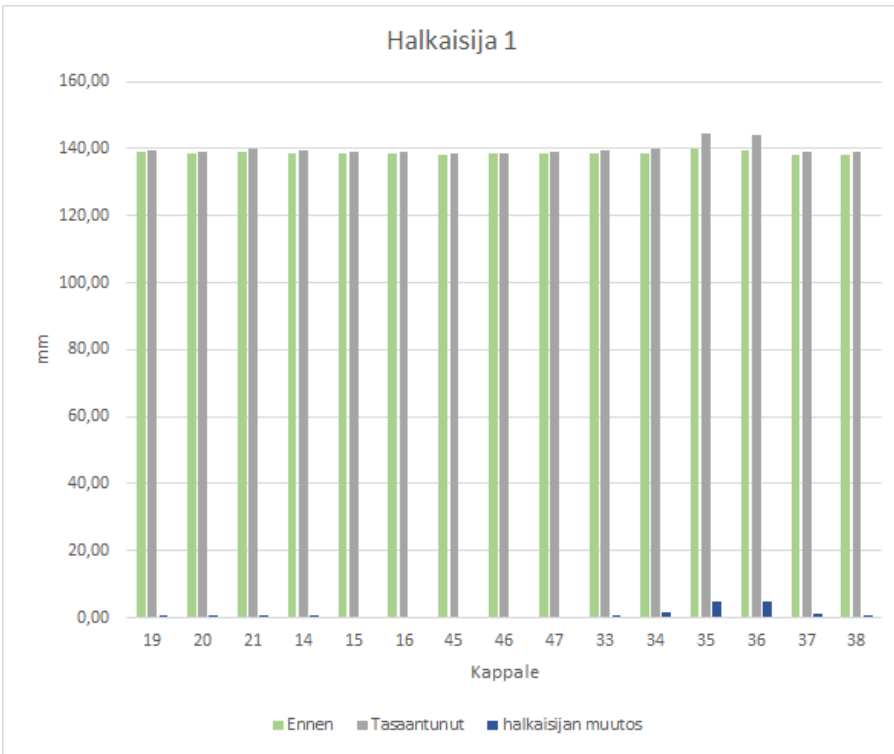
KUVA 12. Dimensiostabiiliusmittauksia (kuva: Hannu Turunen).

Dimensiostabiiliisuustestin aluksi levyt olivat tasaantuneet halliolosuhteisiin (t 20 °C ja Rh 40 %) tehtiin sovellettuna. Koelevyt tasaannutettiin halliolosuhteista standardin mukaisiin vakio-olosuhteisiin (t 20 °C ja Rh 60 %) Puulaboratorion olosuhdehuoneessa. Kappaleiden muodonmuutosten mittaaminen toteutettiin seuraavasti: Kappaleiden pinnalle piirrettiin halkaisija ja toinen halkaisija piirrettiin 90 asteen kulmassa ensimmäiseen. Halkaisijat ja niiden päätepisteet numeroitiin, joten dimensioiden mittaaminen tapahtui aina edellistä kertaa vastaavasta kohdasta. Kappaleiden paksuus mitattiin myös halkaisijan merkin kohdalta. Paksuus mitattiin kahdesta merkitystä kohdasta, jotka olivat saman halkaisijan eri

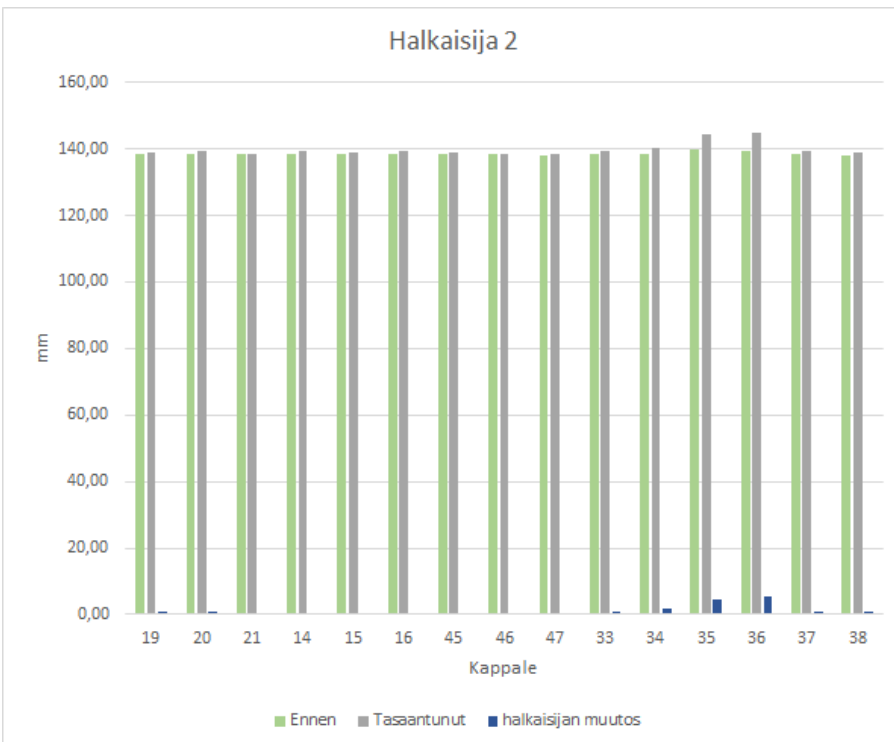
päätepisteet. Kuppiintuminen mitattiin kappaleen yhdeltä reunalta, ennen testiä merkitystä kohdasta. Kuppiintumisen mittauksessa käytettiin apuna painoa, joka asetettiin mittausreunaa kohtisuorassa olevalle vastakkaiselle reunalle. Mittaustapahtuma on esitetty kuvassa 12. Testitulokset on esitetty kootusti taulukossa 2. Kuvissa 13, 14, 15, 16 ja 17 on esitetty koekappaleista määritetyt mitat ennen tasaannutusta, tasaantuneena ja niiden erotuksena laskettu mittamuutos.

TAULUKKO 2. Dimensiostabiliisuuskoe-kappaleiden punnitustulokset.

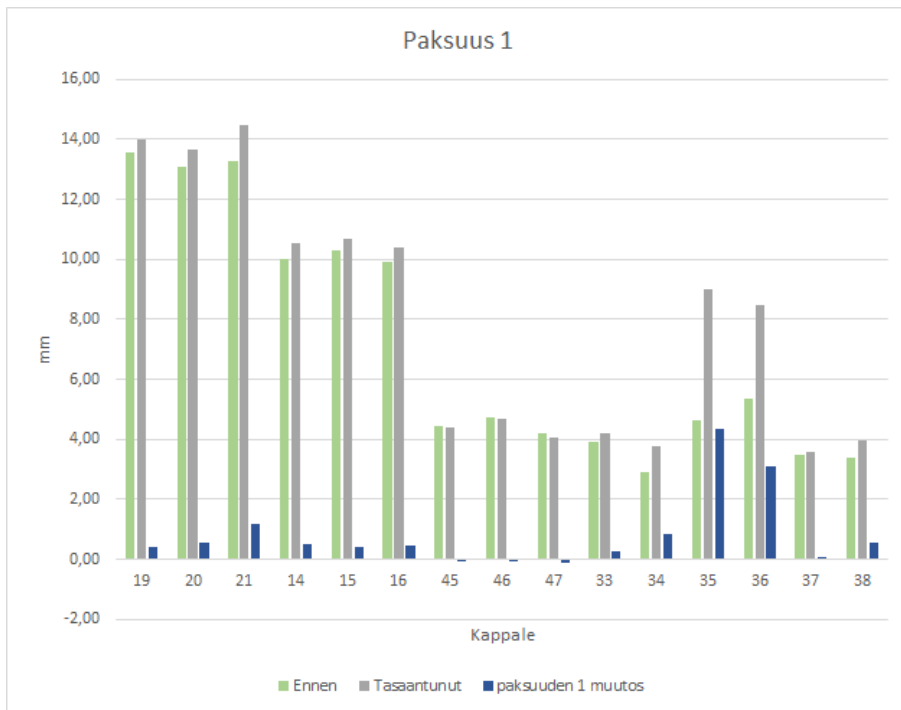
Raaka-aineet ja parametrit	kpl	Alku-paino g	Loppu-paino g	Massa-muutos g	Massa-muutos %
Lämpökäsittely + liima-aine + viilut	19	184,41	188,26	3,85	2,09
350 bar 110 °C 10 min	20	182,65	186,57	3,92	2,15
	21	186,33	190,58	4,25	2,28
Lämpökäsittely + liima-aine	14	149,84	153,03	3,19	2,13
350 bar 110 °C 10 min	15	149,24	152,35	3,11	2,08
	16	149,75	152,84	3,09	2,06
Kutteripuru + liima-aine	45	61,24	62,77	1,53	2,50
150 bar 110 °C 10 min	46	61,14	62,67	1,53	2,50
	47	60,92	62,42	1,50	2,46
Kutteripuru	33	48,56	50,03	1,47	3,03
350 bar 110 °C 10 min	34	49,41	50,98	1,57	3,18
	35	50,62	52,9	2,28	4,50
Kutteripuru	36	50,54	52,73	2,19	4,33
150 bar 110 °C 10 min	37	48,18	49,66	1,48	3,07
	38	47,77	49,21	1,44	3,01



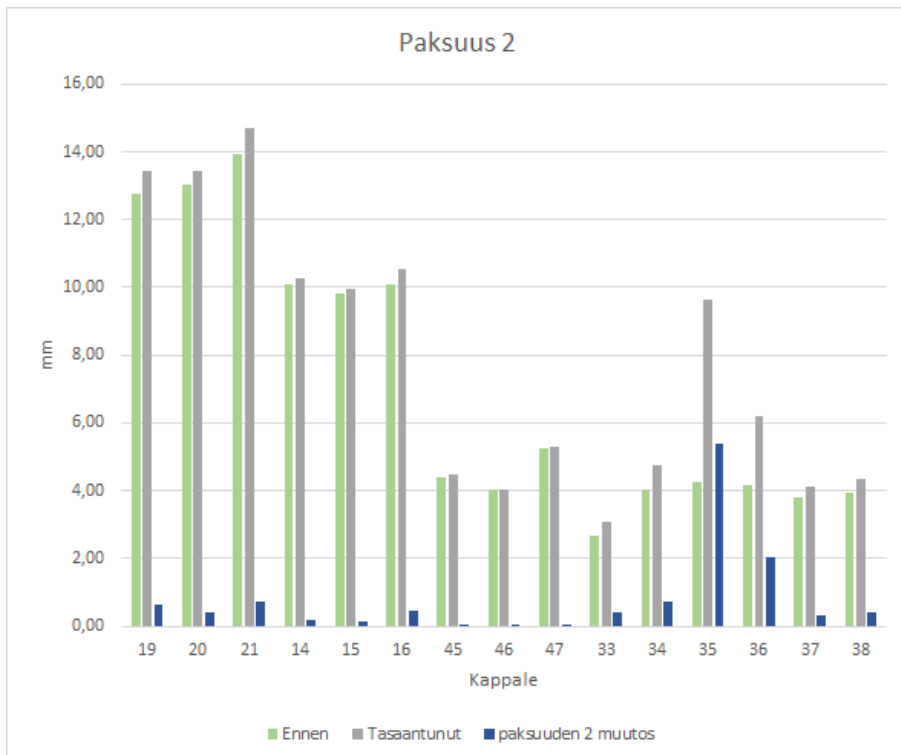
KUVA 13. Dimensiostabiilisuuskoeikkaleiden halkaisijan 1 muutokset.



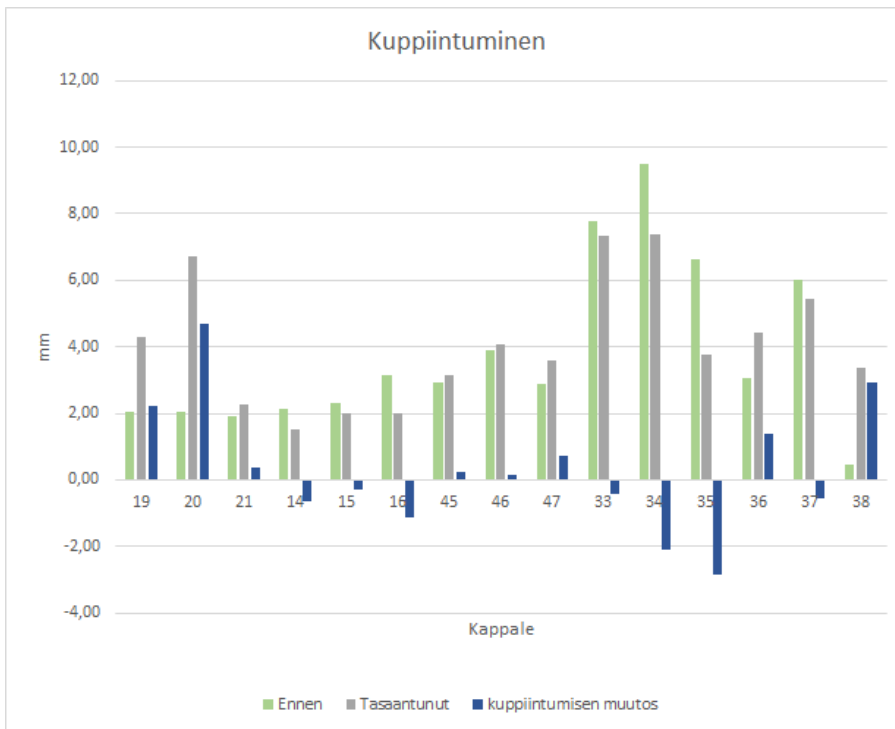
KUVA 14. Dimensiostabiilisuuskoeikkaleiden halkaisijan 2 muutokset.



KUVA 15. Dimensiostabiilisuuskoeikkaleiden paksuuden 1 muutokset.



KUVA 16. Dimensiostabiilisuuskoeikkaleiden paksuuden 2 muutokset.



KUVA 17. Dimensiostabiiisuuskoelempien kuppiintumisen muutokset.

Suurimmat prosentuaaliset massamuutokset mitattiin kutteripurusta valmistetuissa, huokoisissa ja hauraissa levyissä, joiden kosteuspitoisuus puristushetkellä oli noin 10 %. Kutteripurusta valmistetuissa kappaleissa myös mittamuutokset olivat testisarjan suurimpia. Viilupinnoitetuissa levyissä mittamuutokset olivat seuraavaksi suurimpia kutteripurusarjan kappaleiden jälkeen.

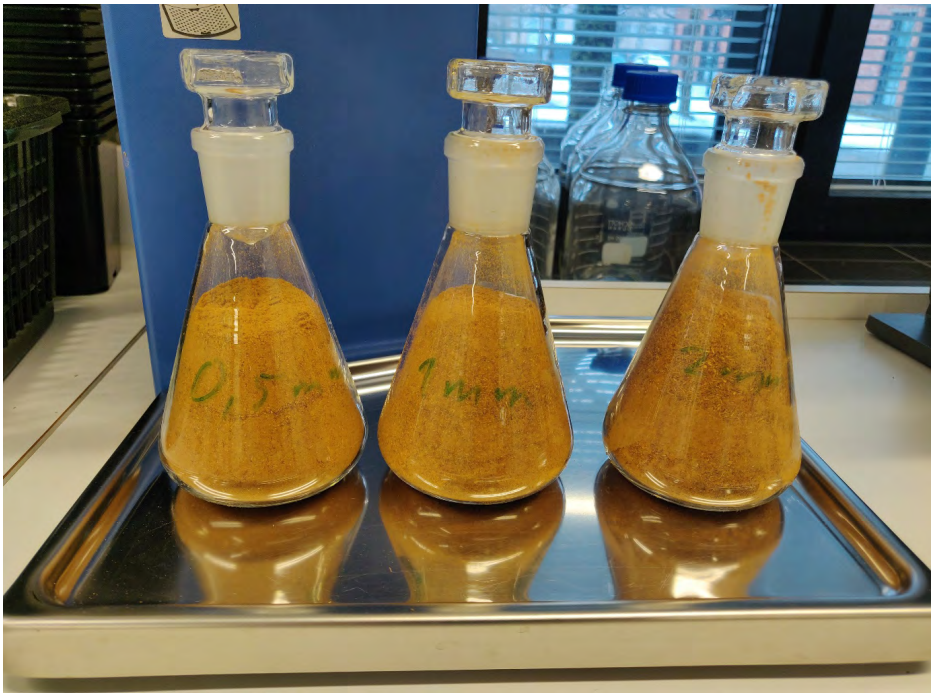
Koska levymäiset tuotteet vaikuttivat potentiaaliselta tavalta hyödyntää murskeita, päätettiin tuotteita skaalata hieman isompaan kokoon. Pinta-alaltaan suurempia arkkeja päätettiin valmistaa Xamkin Puulaboratorion Harko-muotopuristimella. Harko-puristimeen teetettiin lämpölevyt ja rakennettiin alumiinista muotti. Muotin pinta-ala määräytyi Polystat-puristimen puristusvoiman ja ympyräpinta-alaisen muotin mukaan. Aikaisempien koepuristuksien parametrejä haluttiin hyödyntää myös suurempien koelevyjen valmistuksessa.

Harko-puristimen ominaisuuksien perusteella laskettiin, että uuden, suuremman muotin pinta-alan tulisi olla enintään 250 mm x 380 mm, jotta puristusjännityksen arvo muotissa vastaisi Polystat-puristimella käytettyjä arvoja. Levytuotteiden valmistaminen onnistui hyvin. Koska muottipintoja ei ollut mahdollista jäähdyttää, lämpölevyjen annettiin jäähtyä aina puristuksen jälkeen ennen muotin avaamista. 250 x 380 mm:n levyjä valmistettiin samoista raaka-aineista kuin pienempiä levyjä. Suuremmat levyt onnistuivat hyvin.

Hankkeen puitteissa tehtyjen alustavien koelevytestien perusteella murskeesta valmistettujen levyjen valmistamista ja testaamista tulisi jatkaa. Koelevyt onnistuivat hyvin, ja olettavasti kierrätetystä puumateriaalista valmistetuilla levymateriaaleilla voisi korvata neitseellisestä materiaalista valmistettuja tuotteita.

PUUMUOVIKOMPOSIITTI

Puumuovikomposiitteihin liittyvän selvitystyön yhteydessä tutkittiin ja kokeiltiin mahdollisuuksia valmistaa puumuovigranulaatteja Xamkin Ympäristötekniikan laboratoriossa. Tässä yhteydessä lämpökäsitellystä puumurskeesta valmistettiin puupuraa IKA MF 10 basic -veitsimyllyllä. Veitsimyllyssä murske hienonnettiin 2 mm:n, 1 mm:n sekä 0,5 mm:n kokoiseksi jauheeksi (kuva 18). Eri kokoluokilla tullaan testaamaan ruiskuvaluun sopivin jauheen karkeus. Ruiskuvalussa käytetään sideaineena PLA-muovia, jolloin saadaan tuotettua kokonaan kierrätysmateriaalista valmistettua komposiittia.



KUVA 18. Veitsimyllyllä valmistettua puujauhetta 0,5 mm:n, 1 mm:n sekä 2 mm:n kokoluokassa (kuva: Lasse Hämäläinen).

Alustavan selvitystyön yhteydessä tehty lämpöpuun jauhatus sujui odotetusti. Pieniä ongelmia syntyi pölyn karatessa veitsimyllyn sisältä, jolloin jauhatuspaikan ympäristö likaantui ja hengitysilmaan pääsi hienojakoista materiaalia, joka saattaa hankaloittaa hengittämistä.

Käytössä olevassa myllyssä seulan alla oleva jauheen poistoputki tahtoi myös tukkeutua, jolloin osa jauhattavasta materiaalista jäi myllyn sisälle liian pitkäksi aikaa ja jauhautui liian hienojakoiseksi. Materiaalin jauhaminen käytössä olevalla laitteella on myös todella hidasta, joten suurempia eriä tehdessä joudutaan todennäköisesti keksimään muita jauhauskeinoja. Tulevissa kokeissa tulee kiinnittää huomiota myllyn terän kuumenemiseen sekä poistoputken avoimena pysymiseen.

Ympäristölaboratoriolla tehdyn alustavan selvitystyön perusteella ruiskuvalugranulaattien valmistus päätettiin tilata ostopalveluna Elastopoli Oy:ltä Sastamalasta. Granulaattien raaka-aineiksi valikoitui PLA-muovi ja puupöly seossuhteella 70/30. Valmiit granulaatit on esitetty kuvassa 19. Puupölyn Xamkin Puulaboratorioon toimitti Isku Oy. Iskun puupölystä seulottiin 4 mm:n seulalla 5 kg materiaalia, josta Elastopoli valmisti noin 17 kg puumuovigranulaatteja 30 %:n puupitoisuudella. Elastopolin materiaalille ilmoittamat mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.



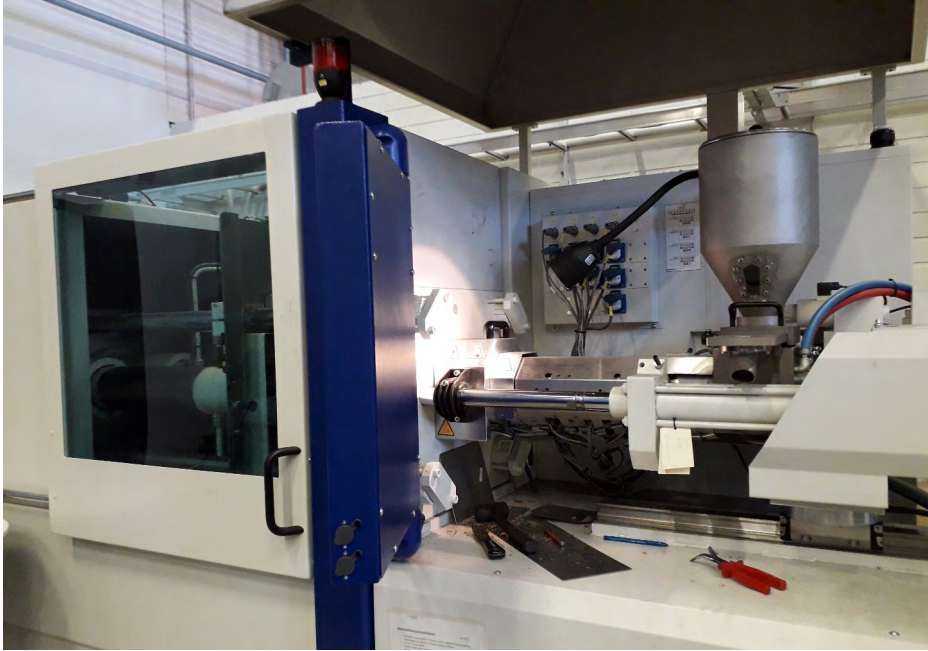
KUVA 19. Puumuovigranulaatteja (kuva: Hannu Turunen).

TAULUKKO 3. Valmistajan ilmoittamat ominaisuudet puumuovimateriaalille (Elastopoli).

Vetolujuus	Venymä	E-Moduli	Taivutuslujuus	Taivutusmoduli	Iskulujuus	Lovi-iskulujuus	Tiheys
33,5	0,6	5,9	48	5,51	5,5	2,62	1,28
MPa	%	GPa	MPa	GPa	KJ/m ²	KJ/m ²	g/cm ³

Puumuovigranulaateista valmistettiin Xamkin Materiaalitekniikan laboratoriossa standardin ISO 527-2 mukaisia vetosauvoja. Vetosauvojen avulla oli tarkoitus selvittää materiaalin vetolujuuden arvo ja kokeilla käytännössä, kuinka raaka-aineesta saadaan valmistettua tuotteita.

Komposiittisauvojen valmistaminen ja vetotestaaminen toteutettiin Xamkin Materiaalitekniikan laboratoriossa Mikkelissä. Puumuovisauvat valmistettiin kuvassa 20 olevalla Battenfeld HM65/130-ruiskuvalukoneella. Koneen prosessiparametrien säätäminen kyseessä olevalle materiaalille oli haastavaa. Säädettäviä parametrejä olivat muun muassa ruiskutusnopeus, -paine, ruuvin ja muotin lämpötila, jälkipaine ja pitoaika.



KUVA 20. Battenfeld HM65/130-ruiskuvalukone (kuva: Hannu Turunen).

Muotti, jota sauvojen ruiskuvalamiseen käytettiin, oli kaksipesäinen ja valmistettu alumiinista Xamkin Materiaalitekniikan laboratoriossa. Yhdellä ruiskutuksella syntyi kaksi standardin mukaista vetosauvaa. Toisessa sauvassa sulamuovi injektioitiin sauvan keskiosasta ja toisessa sauvassa päädystä. Koesauvan eri kohdissa olevien täyttöaukkojen avulla oli tarkoitus selvittää, onko ruiskutuskohdalla vaikutusta sauvan lujuuteen.

Vetosauvojen testaaminen tehtiin Shimadzu AGX-V-aineenkoestuskehällä. Testitulosten perusteella sauvat olivat kovia ja hauraita. Hauraus johtuu osittain suuresta prosentuaalisesta puupurun määrästä kappaleissa ja valitusta matriisimuovista. Matriisimuovin valinnalla voidaan vaikuttaa suuresti kappaleen ominaisuuksiin. Koekappaleiden matriisimuoviksi valittiin PLA sen biohajoavuuden takia. Koestetut vetosauvat on esitetty kuvassa 21 ja koesauvojen dimensiot ennen testiä taulukossa 4.



KUVA 21. Puumuovikomposiittivetosauvoja (kuva: Aapo Nylén).

TAULUKKO 4. Puumuovivetosauvojen mitat.

Kappale	Paksuus	Leveys	Pituus
Yksikkö	mm	mm	mm
PLA + puu _ 1	3,913	10,160	50,00
PLA + puu _ 2	3,836	10,153	50,00
PLA + puu _ 3	3,924	10,215	50,00
PLA + puu _ 4	4,039	10,377	50,00
PLA + puu _ 5	3,880	10,362	50,00
PLA + puu _ 6	3,900	10,270	50,00
PLA + puu _ 7	3,884	10,218	50,00
PLA + puu _ 8	3,956	10,254	50,00
PLA + puu _ 9	3,958	10,234	50,00
PLA + puu _ 10	4,028	10,375	50,00

Vetotestin tulokset on esitetty taulukossa 5. Alustavien testien mukaan suuren prosentuaalisen puupitoisuuden sisältävistä puumuovigranulaateista (puu + PLA) tulisi valmistaa tuotteita, joiden muodossa ja rakenteessa voidaan ottaa huomioon komposiittimateriaalin alhaiset mekaaniset lujuusominaisuudet. Tällä tarkoitetaan tuotteita, joissa mekaaniset ominaisuudet eivät ole ratkaisevan tärkeitä, vaan tuotteissa arvostettaisiin muun muassa materiaalien uusiokäyttöä ja biohajoavuutta.

TAULUKKO 5. Puumuovivetosauvojen vetotestitulokset.

Kappale	F_{max}	σ_M	$E_{t(0,05 - 0,015 \%)}$	ϵ_{max}
Yksikkö	N	N/mm ²	N/mm ²	%
PLA + puu _ 1	224,22	5,6	7 469	0,08
PLA + puu _ 2	838,61	21,5	6 436	0,34
PLA + puu _ 3	413,78	10,3	4 979	0,22
PLA + puu _ 4	765,95	18,3	5 682	0,33
PLA + puu _ 5	477,71	11,9	6 474	0,19
PLA + puu _ 6	516,72	12,9	6 021	0,22
PLA + puu _ 7	1 146,50	28,9	6 934	0,47
PLA + puu _ 8	1 067,07	26,3	5 802	0,48
PLA + puu _ 9	398,01	9,8	5 612	0,20
PLA + puu _ 10	551,21	13,2	6 198	0,22
Keskiarvo	639,98	15,9	6 161	0,28
Keskihajonta	303,00	7,61	711,79	0,13
Maksimi	1 146,50	28,9	7 469	0,48
Minimi	224,22	5,6	4 979	0,08

INNOVATIIVISET HYÖDYNTÄMISVAIHTOEHDOT

Mikko Valkonen & Lasse Hämäläinen & Hannu Turunen
& Tuomas Venäläinen

Hankkeessa tutkittiin kierrätyspuumateriaalin innovatiivisempia hyödyntämismuotoja. Tuoteideoina oli liukkaudentorjuntamurske, akustiikkalevyt sekä biohiili. Tuotekonseptien valinnat tehtiin perustuen muun muassa puhtaudeltaan ja volyymiltaan erilaisten kierrätysjakeiden hyödyntämistä ajatellen. Puhtaimmat jakeet voitaisiin hyödyntää akustiikkalevyissä, B-luokan jakeita suuremman volyymin liukkaudentorjuntamurske- sekä biohiilituotteissa.

Liukkaudentorjuntamursketta valmistetaan ja käytetään Keski-Euroopassa ja sitä on myös kokeiltu Oulussa. Oulun kokeilussa tulokset olivat positiivisia sekä toimijan että asiakkaiden (jalankulkijat ja pyöräilijät) puolelta. Tuotekonseptin ajateltiin soveltuvan hyvin hankkeeseen, sillä kyseessä on kuitenkin volyymituote, jota käytettäisiin laajasti ympäri Suomea. Akustiikkalevyt nähtiin myös hyvänä ideana, koska niissä kierrätysjakeet saataisiin pitkäaikaiseen käyttöön, jolloin myös raaka-aineissa oleva hiili pysyy sidottuna pitkään.

Puujätteen koostumuksen vaihtelevuuden takia kokeet tuli aloittaa tutkimalla erilaisten puumateriaalien murskaamista. Kokeeseen käytettiin Puupolilta haettua puujätettä, jossa oli sekaisin esim. puhdasta mäntylautaa, lämpökäsiteltyä havupuuta, vaneria sekä lastulevyä. Murskaaminen suoritettiin ympäristölaboratoriossa Esko Siirtola Oy:n jätemurskaimella (kuva 1).



KUVA 1. Puujätteen murskaukseen käytetty jätemurskain (kuva: Lasse Hämäläinen).

Puujätettä tuli pienentää murskaimen syöttöaukon mukaisesti. Kokeessa huomattiin murskaimen terän murskaavan paremmin ohutta, rimankaltaista materiaalia. Palat tuli asetella terän päälle siten, että pyöriessään puupalat päätyivät murskaavan osan väliin. Murskaimeen laitettiin kerralla maksimissaan sylillinen puujätettä terän jumiutumisen estämiseksi. Parhain murskaustulos saavutettiin laittamalla murskaimeen muutamia puupaloja kerrallaan.

Murskaaminen oli käytössä olevalla laitteella hidasta. Murskaimen kannen ollessa auki terä ei lähde käyntiin, joten murskattavien palojen painaminen terää vasten ei onnistu. Pienempien palojen kohdalla ongelmaksi muodostui niiden taipumus pomppia terän päällä murskaantumatta. Ongelma saatiin ratkaistua asettelemalla palat tarkasti terän murskaavan osan kohdalle.

AKUSTIIKKALEVYT

Akustiikkalevymateriaalien kehittäminen jätetuujakeita hyödyntäen oli yksi Kiertopuu-hankkeen teemoista. Tutkimustyön tarkoituksena oli löytää optimaalisia materiaali- ja kemikaalimääriä akustiikkatuotteiden valmistamiseksi. Materiaaleina hyödynnettiin lopulta kutteripurua, havupuusellua ja sellujauhetta vaahtorainausprosessiin käytetyn veden ja vaahtonmuodostajan lisäksi. Tuoteprototyypin (kuva 2) valmistus tapahtui vaahtorainauslaitteella. Vaahtorainaus suoritettiin Lumir Oy:n tiloissa.



Akustiikkalevyt absorboivat haitallisen melun ääniaallot muuntaen ne lämpöenergiaksi. Valmistusmenetelmäksi valitun vaahtorainauksen avulla saadaan valmistettua erittäin huokoisia, kolmiulotteisia kevytrakenteita. Luonnonkuitumateriaaleissa (mm. sellu) on paljon tutkittavaa, sillä tavallisemmat polyesteri- sekä kivi- ja lasivillatuotteet eivät ole juurikaan kehittyneet materiaaliratkaisujen saralla. Kierrätystuotteiden tutkimisella haluttiin muun muassa selvittää, onko akustiikkatuotteiden äänenabsorptiota ja kustannustehokkuutta mahdollista parantaa materiaaliratkaisuilla esimerkiksi pelkän geometrian optimoinnin sijaan.

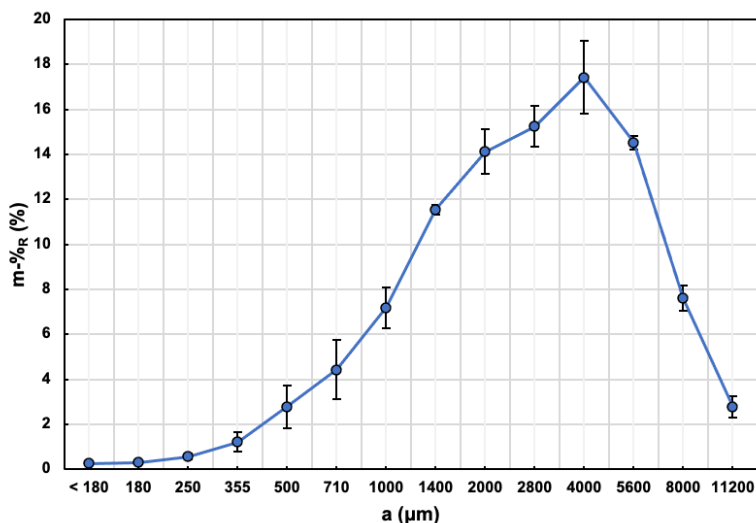
KUVA 2. Valmiita koelevyjä (kuva: Mikko Valkonen).

KUTTERIPURUN PARTIKKELIKOKOJAKAUMAN MÄÄRITYS

Kutteripurun partikkelikokojakauma määritettiin Retsch AS 300 Control Vibratory Sieve Shaker -seulaa käyttäen. Kutteripurua punnittiin n. 25 g, ja seulapakka koostui 180, 250, 355, 500 ja 710 μm :n sekä 1,0, 1,4, 2,0, 2,8, 4,0, 5,6, 8,0 ja 11,2 mm:n seuloista. Erotellut kutteripurut punnittiin seulonnan jälkeen.

KUTTERIPURUN PARTIKKELIKOKOJAKAUMAN TULOKSET

Partikkelikokojakauman tulokset on esitetty kuvassa 3. Suunnilleen 70 % seulalle jääneestä massasta on 1,4–5,6 mm:n partikkelikokovälillä. Kutteripurut vaihtelevat merkittävästi partikkelikoossaan, mikä voi vaikuttaa vaahtorainattujen rakenteiden käytökseen jossain määrin. Tämä vaikutus johtuu siitä, että pienet partikkelit ovat kuin sellun hienojakoinen osuus mekaaniselta käytökseltään ja voivatkin toisin sanoen kasvattaa pinta-alaa sekä aiheuttaa laajempaa turpoamista. Nämä ilmiöt voivat puolestaan kasvattaa liitospinta-alaa, mikä voi parantaa mekaanista lujuutta. On mahdollista, että havupuusellun ja kutteripurun hienojakoinen osuus luo materiaalisiltoja kuidusta toiseen. Nämä sillat vetävät sellukuidut kontaktiin toistensa kanssa kuivumisen aikana, koska niihin vaikuttavat pintajännitysvoimat, ja seurauksena on suurempi sidosmäärä sekä alentunut kuitusegmentin pituus. Merkittävästi suuremmat partikkelit eivät todennäköisesti ole kovinkaan hyvin kiinnittyneitä vaahtorainattuun kuituverkkoon niiden ollessa lähinnä ansassa verkon sisällä. (Mandlez et al. 2020, Pöhler et al. 2020)



KUVA 3. Seulalle jäänyt massafraktio (m-%R) massahäviö huomioiden per seulakoko (a). Keskihajonta on ilmaistu virhepalkkien muodossa.

AKUSTIIKKALEVYJEN PURISTUSTESTI

Puristuslujuustesti suoritettiin sen kuvastaessa tyypillistä kuormitustapaa akustiikkalevyille. Akustiikkalevyjen puristuslujuustesti (kuva 4) suoritettiin standardin SFS-EN 826 (2013) mukaan käyttäen Zwick MTS 1475 -kuormituskehää, jota ohjattiin TestWorks®-ohjelmistolla. Kolme 100 × 100 mm:n näytettä valmistettiin vaahtorainatuista paneeleista vannehallalla. Näytepaksuus oli n. 50 mm, koska näytteet esipuristettiin tähän alkupaksuuteen ennen testiä. Näytteet tasaannutettiin n. 65 %:n suhteellisessa kosteudessa 20 °C:n lämpötilassa yön yli. Alkukuorma oli n. 2,5 N ja puristusnopeus 5 mm/min. Näytteet puristettiin ensin 10 %:n puristumaan, jota seurasi 1 minuutin palautumisaika, ja sitten ne puristettiin 50 %:n puristumaan.



KUVA 4. Puristuslujuustestin suoritus (kuva: Mikko Valkonen).

Alhaisempi alkupuristuma tehtiin, jotta voitiin määrittää puristuskimmokerroin, kun taas palautumista seurattiin lähinnä sen määrittämiseksi, palautuuko testinäyte alkuperäiseen paksuuteensa tuosta 10 %:n puristumasta. Näytteet palautuivat 10 %:n puristumasta alkupaksuuteensa. Mittausten jälkeen 50 %:n puristumaan puristetut näytteet jätettiin viikoksi palautumaan, jonka jälkeen niiden loppupaksuus mitattiin.

Taulukko 1 sisältää näytteiden nimet, komponenttimassat, kuivien näytteiden bulkkitiheyden, puristuslujuuden, ominaispuristuslujuuden, puristuskimmokertoimen ja palautuman. Näytenimet viittaavat näytteiden samankaltaisuuteen, esim. S1A ja S1B viittaavat näytteisiin, joiden ainoa ero on sellujauheen eri määrä. Sama logiikka pätee myös muihin näytteisiin. Kapillaarivoimat tuovat lähekkäin olevat kuidut läheiseen molekulaariseen kontaktiin vaahtorainattujen materiaalien kuivussa (Hubbe 2019). Havaitaan, että mitä enemmän sellujauhetta oli rakenteessa, sitä korkeammat bulkkitiheydet kuivassa tilassa saatiin. Saadut tiheydet ovat korkeassa päässä keskitiheitä rakenteita, joiden tiheys vaihtelee välillä 20–100 kg/m³ (Ketoja et al. 2019). Tiheyden kasvu voidaan liittää sellujauheen sidoslaatu parantavaan vaikutukseen kutteripurun ja havupuusellun välillä. Todennäköisempää on kuitenkin se, että sellujauhe parantaa havupuusellukuitujen toisiinsa liittymistä em. sijaan.

TAULUKKO 1. Näytenimet, kutteripurun massa (mCSs), havupuusellun massa (mSW pulp), sellujauheen massa (mCP), kuivabulkkitiheys (ρ), puristuslujuus 50 %:n puristumaan (σ_{50}), ominaispuristuslujuus 50 %:n puristumaan ($\sigma_{s,50}$), puristuskimmokerroin (E), ja palautuma 1 viikon päästä (P) kunkin näytteen osalta. Näytteen standardipoikkeama on suluissa.

Näyte	m _{CSs} (g)	m _{SW pulp} (g)	m _{CP} (g)	ρ (kg/m ³)	σ_{50} (kPa)	$\sigma_{s,50}$ (Nm/g)	E (kPa)	P (%)
S1A	0,00	534,55	112,58	87,95 (12,30)	227,33 (55,63)	2,58 (0,63)	493,29 (55,15)	73,65 (2,98)
S1B	0,00	534,55	168,89	91,77 (4,85)	228,33 (21,73)	2,49 (0,24)	559,96 (26,48)	70,29 (3,61)
S2A	108,35	427,64	112,88	89,95 (1,95)	152,67 (11,02)	1,70 (0,12)	293,31 (30,55)	74,44 (1,05)
S2B	108,35	427,64	169,58	94,22 (0,90)	209,33 (6,11)	2,22 (0,06)	363,31 (25,16)	73,86 (0,74)
S3A	216,70	320,73	113,26	82,53 (1,82)	164,67 (5,51)	2,06 (0,07)	276,61 (32,14)	70,62 (1,03)
S3B	216,70	320,73	169,71	89,53 (4,44)	179,33 (19,09)	2,00 (0,21)	243,32 (23,09)	69,91 (6,24)
S4A	297,96	240,55	113,41	82,58 (2,72)	130,00 (13,11)	1,57 (0,16)	183,32 (20,81)	63,35 (0,44)
S4B	297,96	240,55	170,12	87,81 (4,43)	159,67 (8,08)	1,82 (0,09)	229,98 (34,64)	65,62 (4,60)
S5A	379,23	160,37	113,88	82,43 (1,37)	114,00 (7,00)	1,38 (0,08)	166,65 (5,76)	63,67 (4,35)
S5B	379,23	160,37	170,47	91,92 (1,32)	155,00 (13,23)	1,69 (0,14)	163,32 (15,27)	68,79 (0,90)

Sellujauhe todennäköisesti muodostaa kuitumaista kietoutumista havupuusellukuitujen ja itsensä kanssa nanokuidutetun tai mikrokuidutetun selluloosan kaltaisesti. Sellujauheella on kuitumainen koostumus (Shokri ja Adibkia 2013). Se voi myös estää märän vesimeniski-alueen vetäytymistä veden haihtuessa materiaalien kuivuessa. Nämä ilmiöt taas kasvattavat molekulaarista kontaktialuetta ja parantavat sitoutumista. Koska sellujauhe on muita käytettyjä materiaaleja pienempi partikkelikooltaan, niin sillä on suurempi ominaispinta-ala kuin kutteripurulla tai havupuusellulla. Tämä ero pinta-alassa vaikuttaa myös sellujauheen sidosaineena toimimiseen. Toki on mahdollista, että pienempää havupuusellun hienojakoista partikkelia löytyy rakenteista ja nämä voivat vaikuttaa sitoutumiseen. (Osong et al. 2016, Hubbe 2019)

Kun sellujauhe sekoitetaan eritoten havupuusellun kanssa, niin se muodostaa vetysidoksia havupuusellun kanssa. Näin ollen suurempi määrä sellujauhetta johtanee suurempaan vetysidosten määrään (Pesonen et al. 1989). Voidaan olettaa, että tiheimmät osuudet rakenteista saavat osakseen enemmän vetysidoksia ainesosien ollessa lähempänä toisiaan, koska rakenteet esipuristettiin 50 mm:n paksuuteen. Massa kasvaa myös jonkin verran lisätyn sellujauheen mukaan, ja tämä selittää myös jossain määrin tiheyden kasvun. Rakenteilla oli myös tiheysgradientti mm. esipuristuksen ansiosta. Toisin sanoen rakenteet olivat tiiviimpiä pintakerroksistaan ja väljempiä keskikerroksistaan. Tästä syystä puristuksen alaisena rakenteiden keskikerrokset puristuivat kasaan ensin ja myöhemmin pintakerrosten tiiviimpi materiaali vastusti enemmän kasaan puristumista. Toisaalta vaahtorainatut rakenteet tunnetaan kovin tasaiselta käytökseltään puristuksen alaisena, koska ne jakavat kuorman tasaisemmin koko rakenteelle (Järvinen et al. 2018).

Lujuuden ja ominaislujuuden (lujuus jaettuna bulkkitiheydellä) nähdään alenevan kutteripurun lisäyksen myötä. Syynä tähän nähdään se, että kutteripuru ja havupuusellu eivät liity toisiinsa kovinkaan hyvin. Tätä ei juurikaan edesauta tarttuvuutta parantava sellujauhekaan. Liittymisen heikkous johtunee siitä, että kutteripuru sisältää enemmän ligniiniä (puun polymeeri ja rakenneos) kuin havupuusellu. Ligniini heikentää kemiallisten vuorovaikutusten laatua kutteripurun ja havupuusellun välillä, koska kutteripurupinnan ligniini häiritsee vetysidosten muodostumista kutteripurun ja havupuusellun sisältämän selluloosan (puun polymeeri ja rakenneos) välille. (Shao ja Li 2006)

Verrattain sellujauheen lisäys kasvattaa lujuutta. Sellujauhe toimii tartuntaa parantavana aineena havupuusellukuitujen välillä sen kulkeutuessa kuitujenvälisiin liitoskohtiin materiaalin kuivuessa. Näissä liitoskohdissa sellujauhe kasvattaa suhteellista sidospinta-alaa kuitujen välillä (Paunonen et al. 2018). Kuivunut sellujauhe tunnetaan hauraana materiaalina (Ek ja Newton 1998, Kleinebudde et al. 2000), mikä voidaan jokseenkin havaita palautuvuudesta, koska sellujauhetta enemmän sisältävät näytteet palautuivat huomattavasti. Tämä hauraus oli käsin kosketeltavaa näytteissä niiden kuivuttua.

Puristuskimmokerroin alenee kutteripurun määrän kasvaessa. Voidaan todeta, että kutteripurun ja havupuusellun välillä on oltava vain todella heikkoja vuorovaikutuksia. Kutteripurupartikkelit ovat vain fyysisesti jumissa vaahtorainattujen rakenteiden sisällä ja eivät sellaisenaan käytännössä vaikuta näyterakenteen lujuuteen. Kutteripurut lisäävät epäjatkuvuuskohtien määrää rakenteissa ja toimivat heikkoina linkkeinä kokonaisuuden kannalta, jolloin kutteripurun määrän kasvaessa puristuskäytös on enenevässä määrin näiden epäjatkuvuuskohtien määräämää (Alava ja Niskanen 2006).

Lisätty sellujauhe vaikuttaa kasvattavan puristuskimmokerrointa per näyte kokonaisuuden kannalta. Tämä kasvu voidaan linkittää sellujauheen liima-aineen kaltaisiin ominaisuuksiin. Poikkeusnäytteitä tosin on, ja ne voidaan selittää suurilla näytteen standardipoikkeaman arvoilla. Sellujauhe kulkeutuu havupuusellukuitujen välille, jossa se parantaa sidosten laatua, mikä selittää sen positiivisen vaikutuksen puristuskimmokertoimeen.

Palautuman havaitaan heikkenevän kasvavan kutteripurun määrän myötä. Sellujauheella taas ei ole selkeää vaikutusta palautumaan. Kyseinen materiaali ei tee rakenteista elastisempia ainakaan käytetyissä määrissä. On kuitenkin huomioitava, että näytteen standardipoikkeamat ovat suuria useissa tapauksissa, ja vähäisemmän kutteripurumäärän parempi palautumatrendi on jokseenkin epäselvä, mikäli tarkkaillaan huonoimpien näytteiden standardipoikkeamia. Lähes täydellisen palautuman puuttuessa voidaan todeta, että puristuskuormitus vaurioittaa vaahtorainattuja rakenteita pysyvästi. Tämä viittaisi siihen, että epäelastinen nurjahdus on muodonmuutoksen takana, kuten Pöhler et al. (2020) toteavat. Pöhler et al. (2020) eivät liitä palautumaa sidostason asioihin (Paunonen et al. 2018).

Rakenteellisesti valmistetut biokomposiittipaneelit olivat riittävän kestäviä. Havaittiin, että kutteripurun lisäys heikensi kestävyyttä. Näytelujuus alenee kutteripurun määrän kasvaessa, koska kutteripurun ligniini heikentää vetysidosten muodostumista ainakin kutteripurun ja havupuusellun välille. Lisäksi kutteripuru on käytännössä jumissa vaahtorainattujen rakenteiden kolmiulotteisessa koostumuksessa ja voi tällöin heikentää kuitujen toisiinsa kietoutumista. Mikäli kutteripurua halutaan hyödyntää tuotemateriaalina, tuotekehityksen kannattaisi keskittyä palautuvuuden säätämiseen materiaaliominaisuuksien muokkauksen avulla. Tällöin olisi lisättävä sellaisen kemian omaavaa ainetta, joka tekee rakenteista elastisempia ja samaan aikaan minimoi kutteripurupartikkelien irtoamisen. Tämä voitaisiin saada aikaan jollain soveltuvalle pinnoitusaineella, jonka olisi hyvä olla vähintään biopohjainen.

AKUSTIIKKALEVYJEN ÄÄNENABSORPTIOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN

Äänenabsorptiokerroin määritettiin standardin SFS-EN ISO 10534-2 (2001) mukaan. Tässä hyödynnettiin Cuchareron ja kumppaneiden (2021) kuvaamaa menetelmää. Isolla impedanssiputkella tehtiin kaksi mittausta per näyte, ja kahdesta neljään mittausta suo-

ritettiin pienellä putkella. Kutteripurua 100 % sisältävät näytteet mitattiin irtonaisina partikkeleina siten, että impedanssiputki oli kiinnitetty pystysuuntaan (Boubel et al. 2021). Näytteet leikattiin 45 mm:n paksuuteen, jotta saataisiin edustavampia akustiikkatuloksia poistamalla kokonaisuudessaan 5 mm näytteen molemmilta puolilta.

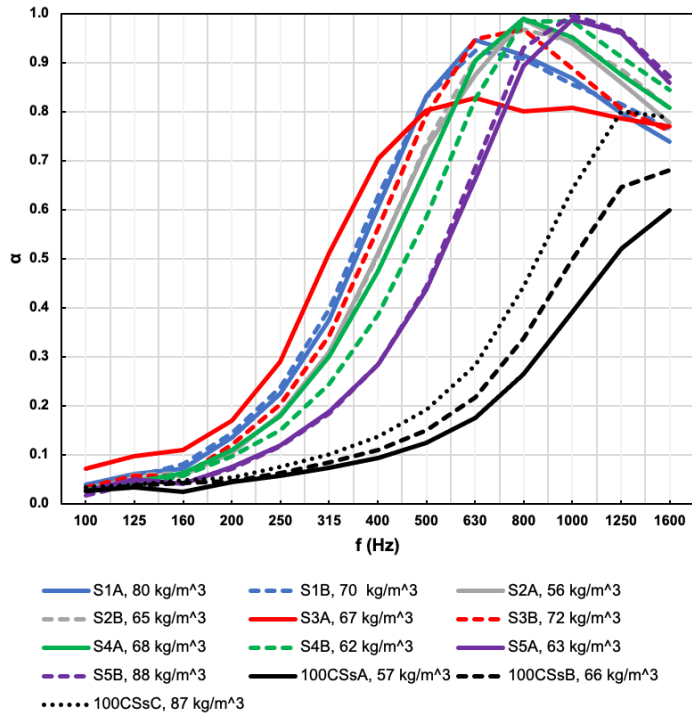
ÄÄNENABSORPTIOKERTOIMIEN TULOKSET

Kuvat 5 ja 6 havainnollistavat äänenabsorptiokertoimen arvoja tässä työssä tutkituille huokoisille rakenteille. Taajuusalue on 100–1 600 Hz (kuva 5) sekä 500–6 000 Hz (kuva 6) välillä. Ainoastaan kutteripurua sisältävien näytteiden absorptio on heikompi. Tätä heikompaa absorptiota selittävät lähinnä rakenteen suuret huokokset, joista seuraa alhainen ilmavirranvastus. Toisin sanoen materiaalilla on alhainen vastustuskyky jatkuvaa ilmavirtaa vastaan.

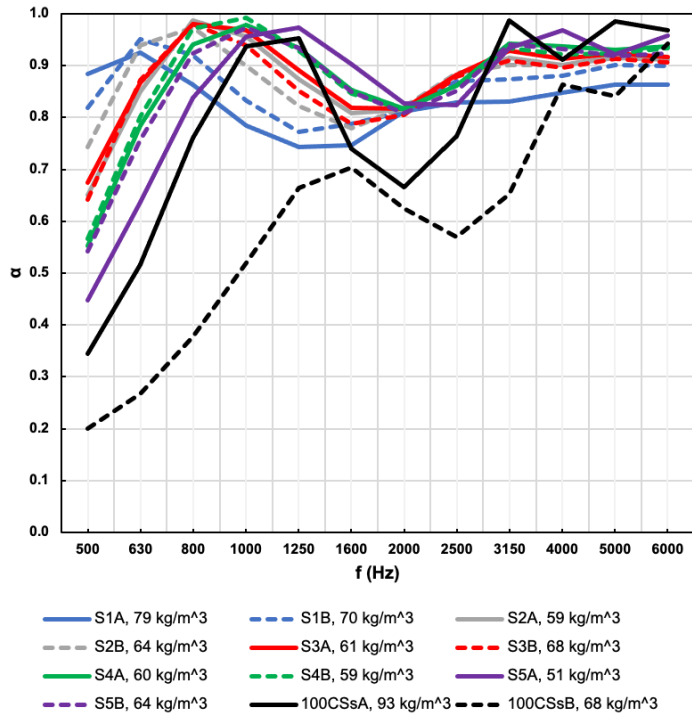
Heikot viskoositermitiset vaikutukset materiaalin rakenteen sisällä voivat selittää suuret absorptiopiikit tietyillä taajuuksilla. Nämä vaikutukset vahvistavat suoran ja jäykästä taustamateriaalista heijastuneen äänen interferenssiä. Kutteripurunäytteiden tiheyden kasvatus johtaa kasvaneeseen absorptioon ja ensimmäisen absorptiopiikin siirtymiseen kohti alhaisempia taajuuksia. Tämä absorption kasvu voidaan linkittää merkittävämpiin viskoositermisiin ilmiöihin huokoisessa rakenteessa. Nämä ilmiöt johtunevat mutkittelevuuden kasvusta – toisin sanoen ääniäällön kulkureitin pituuden kasvusta, joka juontaa juurensa alhaisemmasta huokoskoosta. Kun viskoositerminen vaikutus huokoisen rakenteen sisällä kasvaa, niin suoran ja heijastuneen äänen interferenssiin liittyvän äänenabsorptiomekanismin vaikutus vähenee tämän kasvun seurauksena.

Niiden näytteiden, joiden koostumus oli havupuusellun ja kutteripurun sekoitus, äänenabsorptio-ominaisuudet ovat pikemminkin kuituverkon hallitsemia rakeisen rakenteen sijaan. Näille hybridinäytteille havaittiin absorption olevan suurempi ja ensimmäinen absorptiopiikki löytyy alhaisemmilta taajuuksilta. Näiden näytteiden absorptiokäyrät tasaantuvat ensimmäisen absorptiopiikin jälkeen, mikä viittaa siihen, että viskoositermitiset vaikutukset ovat dominoivia äänenabsorptiomekanismeja ko. näytteille.

Ensimmäinen absorptiopiikki liikkuu kohti alhaisempia taajuuksia havupuusellumäärän kasvaessa ja kutteripurumäärän vähentyessä. Tämä ilmiö voidaan liittää mutkittelevuuden kasvuun, koska kutteripurujen poistaminen näytteistä johtaa alhaisempaan suurien huokosten sisältämien näytteiden määrään. Näytteen S3A (kuva 5) ensimmäinen absorptiopiikki on merkittävästi alentunut, mikä ei korreloi yleisen trendin kanssa, joka on havaittavissa muissa näytteissä. Tämä poikkeavuus voinee johtua ko. näytteen epähomogeenisuuksista. Kuten nähdään kuvista 5 ja 6, sellujauheen määrän vaihtelu ei juurikaan vaikuta tutkittujen näytteiden äänenabsorptio-ominaisuuksiin.



KUVA 5. Äänenabsorptiokerroin (α) taajuuden (f) funktiona suurille näytteille. Näytteen bulkkitiheys on ilmaistu kuvatekstissä per tapaus.



KUVA 6. Äänenabsorptiokerroin taajuuden funktiona pienille näytteille. Näytteen bulkkitiheys on ilmaistu kuvatekstissä per tapaus.

LIUKKAUDENTORJUNTAMURSKKE

Sveitsiläinen Stop Gliss Bio -yritys on valmistanut puuhakkeesta hiekoitushiekan ja tiesuolan korvaajaa (Stop Gliss Bio, 2021). Puuhake kyllästetään magnesiumkloridiliuoksella, joka auttaa paloja pureutumaan jäiseen katuun. Puisella korvikkeella pyritään pienentämään esimerkiksi hiekan lakaisemisesta syntyvää pölyhaittaa, joka aiheuttaa vuosittain hengitystieoireita varsinkin kaupungeissa asuvalle väestölle, sekä tiesuolan aiheuttamia ympäristövaikutuksia.

Kokeessa käytettiin kahta erilaista puujätettä: puhdasta mäntylautaa ja lämpökäsiteltyä havulautaa. Jätejakeet murskattiin, minkä jälkeen murske seulottiin 8 mm:n seulan läpi pienimpien tikkujen poistamiseksi. Seulonnan jälkeen murske kyllästettiin alipainekyllästyksellä. Kyllästyksessä testattiin magnesiumkloridia sekä kalsiumkloridia kyllästyssuolana ja niistä valmistettiin 10-prosenttiset liuokset. Kyllästyksessä toimitettiin standardia EN 113 soveltaen. Kyllästyspaine oli 70 ± 10 kPa 15 minuutin ajan, jonka jälkeen palat jätettiin liuokseen kahdeksi tunniksi. Kyllästyksen jälkeen paloja kuivatettiin uunissa 105 °C:ssa 24 tunnin ajan.

Jalkakäytävää kuvaamaan valittiin muovinen alusta, joka täytettiin vedellä ja jäädytettiin pakkahuoneessa. Testialustan jäädyttyä suolalla kyllästetyt murskeet levitettiin niille rajatuille alueille ja niiden toimintaa verrattiin kontrollina toimineisiin käsittelemättömiin murskeisiin (kuva 7).



KUVA 7. Suolaliuoksella käsiteltyjen puumurskeiden testaus jääalustalla kontrolliin verrattuna (kuva: Lasse Hämäläinen).

Murskeen levitysmäärä laskettiin puulastujen ohjeellisen levitysmäärän mukaan 150 g/ m^2 . Murskeen luistoneston arvioimiseen käytettiin pelkästään aistinvaraisia havaintoja.

Aiempien tutkimuksien mukaisesti pienen mittakaavan kokeissa huomattiin suolaliuksilla kyllästettyjen puulastujen tarttuvan jään pintaan ja toimivan liukuesteinä. Käsittelemättömät puulastut jäivät jään pinnalle ja liukuivat siinä hiekan tapaan. Suolakäsitellyt lastut jäätyivät pintaan kiinni, mikä paransi pitoa. Kalsiumkloridilla käsitellyt lastut pureutuivat jäähän hieman paremmin kuin magnesiumkloridilla käsitellyt, mutta jatkokokeissa tulee eron syntymistä ja suuruutta tutkia tarkemmin.

Liukkaudentorjuntamurskeelle tehtyjen alustavien selvitysten ja ensimmäisistä, Ympäristölaboratoriolla tehdyistä kokeista saatujen positiivisten tulosten jälkeen käsittelyä päätettiin jatkaa Puutekniikanlaboratoriolla. Jatkotesteihin käsittelyaineeksi valittiin kaliumformiaatti. Kyllästyksot toteutettiin Xamkin Puutekniikan laboratorion alipainekyllästyslaitteistolla soveltaen standardia EN 113. Puutekniikanlaboratoriolla tehtiin pienemmän mittakaavan koekyllästyksiä kolmella erilaisella liuosvahvuudella. Kolmessa ensimmäisessä kyllästyksessä käsiteltiin viittä eri raaka-aineista valmistettua murskettä, ja murske-erien massat vaihtelivat 250 g:n ja 550 g:n välillä. Kyllästettyjen murske-erien tilavuudet olivat lähes toisiaan vastaavat. Hajonta näyte-erien massoissa johtui pääasiassa raaka-aineiden kosteuspitoisuuksista. Murskeita valmistettiin kierto- ja kertalavoista, lämpöpuusta, energiapuusta, selluhakkeesta ja betonivalujen muottilauoista. Suurimmat kosteuspitoisuudet ja massat olivat selluhake-erissä, sillä haketta ei ollut kuivattu ennen kyllästyksiä. Muiden jakeiden raaka-aineet olivat kuivattuja.

Kolmen ensimmäisen koekyllästyssarjan tarkoituksena oli testata, kuinka kemikaali toimii erilaisten raaka-aineiden kanssa, ja selvittää sopiva liuosvahvuus, niin että murskeet tarttuisivat jäähän kiinni olosuhdekaapissa tehtävässä pakkastestissä. Koekyllästyksen tulosten perusteella lasketut koemateriaalierien massamuutokset on esitetty kuvassa 8.

Ensimmäinen kyllästyksistä tehtiin toimitusvahvuisella Kemionin Ecomelter L -kaliumformiaattiliuksella. Murskeet kyllästyivät hyvin. Kyllästyksen jälkeen näytteiden annettiin tasaantua ja kemikaalin kiinnittyä murskeisiin ennen pakkastestiä. Olosuhdekaapissa toteutetun pakkastestin koejärjestely on esitetty kuvassa 9 ja 10. Testiastioissa jäädytettiin noin yksi litra vettä / murskesarja. Kaikki viisi samalla käsittelyaineliuksella alipainekyllästettyä murskesarjaa testattiin samalla kertaa. Ensimmäisen pakkastestin aikana näytteet ja niissä oleva kaliumformiaatti sulattivat astioissa olevan jään. Jään sulamisen johdosta seuraava koekyllästystä varten toimitusvahvuista liuosta päätettiin laimentaa verkostovedellä (suhde 1:1).

Ensimmäiseen koekyllästyksen verrattuna koemateriaalinäytteiden massamuutokset olivat toisessa kyllästyksessä suurempia. Suuremmat massamuutokset johtuivat todennäköisesti laimeamman liuksen alhaisemmasta viskositeetistä. Alhaisemman viskositeetin omaava liuos mahdollisti paremman tunkeuman, joka johti suurempaan massan kasvuun huolimatta laimeamman kyllästyслиuksen alhaisemmasta ominaispainosta. Pakkastesti toteutettiin edellistä vastaavasti. Pakkastestin aikana jää sulii astioista lähes kokonaan.



KUVA 8. Koemateriaalierien massamuutokset.



KUVA 9. Pakkastestin koejärjestely (kuva: Hannu Turunen).



KUVA 10. Pakkastestin toteutus (kuva: Hannu Turunen).

Kolmannessa kyllästyksessä kaliumformiaatin ja verkostoveden suhde kyllästysliuoksessa oli 1:3. Kolmannen kyllästyserän pakkastestissä murskeet sulattivat jäätä, mutta vähemmän kuin ensimmäisen ja toisen kyllästyserän testimurskeet.

Neljännessä ja viidennessä kyllästyksessä käsiteltiin 10 kg:n murske-eriä. Murske-erät valmistettiin selluhakkeesta. Molemmissa kyllästyksissä murske-eriä oli kaksi. Neljännessä kyllästyksessä liuosväkevyyden suhde oli 1:3 ja viidennessä 1:4, kaliumformiaatin ja verkostoveden suhteena.

Neljännän ja viidennen kyllästyksen pakkastesti toteutettiin Xamkin Puulaboratorion pihalla. Piha oli jäinen ja lämpötila noin $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Murskeiden tarkastelu tehtiin seuraavana päivänä. Näytteet olivat sulattaneet jäätä ja tuntuivat pysyvän paikallaan kävellessä niiden päällä, mutta näytteet eivät olleet kuitenkaan tarttuneet jäähän kiinni. Jään sulaminen murskeen ympäriltä on havaittavissa kuvasta 11.



KUVA 11. Murskeiden testaaminen ulko-olosuhteissa (kuva: Hannu Turunen).

Kaliumformiaattikyllästykset erilaisille murskemateriaaleille onnistuivat hyvin. Liuosvahuudesta riippuen murskeet sulattivat jäätä ympäriltään enemmän tai vähemmän, ja tästä johtuen murskeet painuivat osittain jäähän. Olosuhdekaappi- ja ulkotestitulokset olivat lupaavia, ja menetelmän tutkimista kannattaa jatkaa. Optimaalinen liuosvahuus tulisi selvittää, ja käytetyn murskeen keräämis- ja jatkokäyttömahdollisuuksia tulisi tutkia tarkemmin. Tarpeellista olisi myös tutkia mahdollisuutta jättää murske maatumään ja selvittää sen ympäristövaikutukset. Menetelmän etuna on, että tuotteita voidaan valmistaa helposti ja soveltuvaa raaka-ainetta olisi myös hyvin tarjolla. Oletettavaa on myös, että menetelmän käyttö vähentäisi esimerkiksi hiekoitusmurskeen keräämisestä ja katujen puhdistamisesta syntyvää katupölyn määrää.

LÄHTEET

- Alava, M., ja Niskanen, K. (2006). "The physics of paper," *Rep. Prog. Phys.*, 69(3), 669–723. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/3/R03>
- Boubel, A., Garoum, M., Bousshine, S., ja Bybi, A. (2021). "Investigation of loose wood chips and sawdust as alternative sustainable sound absorber materials," *Appl. Acoust.*, 172, 107639. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107639>
- Cucharero, J., Ceccherini, S., Maloney, T., Lokki, T., ja Hänninen, T. (2021). "Sound absorption properties of wood-based pulp fibre foams," *Cellulose*, 28, 4267–4279. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03774-1>
- Ek, R., ja Newton, J. M. (1998). "Microcrystalline cellulose as a sponge as an alternative concept to the crystallite-gel model for extrusion and spheronization." *Pharm. Res.*, 15(4), 509–512. <https://doi.org/10.1023/A:1011905222168>
- Hubbe, M. A. (2019). "Nanocellulose, cationic starch and paper strength," *Appita J.*, 72(2), 82–93. <https://doi.org/10.3316/INFORMIT.591826137919535>
- Järvinen, M., Pihko, R., ja Ketoja, J. A. (2018). "Density development in foam forming: wet pressing dynamics," *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 33(2), 226–236. <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-3031>
- Ketoja, J. A., Paunonen, S., Jetsu, P., ja Pääkkönen, E. (2019). "Compression strength mechanisms of low-density fibrous materials," *Materials*, 12(3), 384. <https://doi.org/10.3390/ma12030384>
- Kleinebudde, P., Jumaa, M., ja El Saleh, F. (2000). "Influence of degree of polymerization on the behavior of cellulose during homogenization and extrusion/spheronization," *AAPS PharmSci*, 2(2), 18. <https://doi.org/10.1208/ps020321>
- Mandlez, D., Zangl-Jagiello, L., Eckhart, R., ja Bauer, W. (2020). "Softwood kraft pulp fines: application and impact on specific refining energy and strength properties," *Cellulose*, 27, 10359–10367. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03467-1>
- Osong, S. H., Norgren, S., ja Engstrand, P. (2016). "Processing of wood-based microfibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose, and applications relating to papermaking: a review," *Cellulose*, 23, 93–123. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0798-5>

Paunonen, S., Timofeev, O., Torvinen, K., Turpeinen, T., ja Ketoja, J. A. (2018). "Improving compression recovery of foam-formed fiber materials," *BioResources*, 13(2), 4058–4074. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.4058-4074>

Pesonen, T., Paronen, P., ja Puurunen, T. (1989). "Evaluation of a novel cellulose powder as a filler-binder for direct compression of tablets," *Pharm. Weekbl. (Sci.)*, 11(1), 13–19. <https://doi.org/10.1007/BF01972909>

Pöhler, T., Ketoja, J. A., Lappalainen, T., Luukkainen, V. M., Nurminen, I., Lahtinen, P., ja Torvinen, K. (2020). "On the strength improvement of lightweight fibre networks by polymers, fibrils and fines," *Cellulose*, 27, 6961–6976. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03263-x>

SFS-EN 826 (2013). "Thermal insulating products for building applications. Determination of compression behaviour," Finnish Standards Association SFS ry, Helsinki, Finland.

SFS-EN ISO 10534-2 (2001). "Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: Transfer-function method," Finnish Standards Association SFS ry, Helsinki, Finland.

Shao, Z., ja Li, K. (2006). "The effect of fiber surface lignin on interfiber bonding," *J. Wood Chem. Technol.*, 26(3), 231–244. <https://doi.org/10.1080/02773810601023438>

Shokri, J., ja Adibkia, K. (2013). "Chapter 3: Application of cellulose and cellulose derivatives in pharmaceutical industries," in: *Cellulose - Medical, Pharmaceutical and Electronic Applications*, T. van de Ven, and L. Godbout (eds.), IntechOpen Limited, London, UK, pp. 47–66. <https://doi.org/10.5772/55178>

Stop Gliss Bio. 2018. Presentation. Saatavissa: <http://www.stopglissbio.com/index.php/en/stopglissbio-en/presentation>

