



Kutteripuru uusiotuotteiksi

KIERTOKASVU-HANKKEEN PILOTTI PURUTESTAUS

Teemu Sikanen

Johanna Räikkönen

Kutteripuru uusiotuotteiksi – Kiertokasvu-hankkeen Pilotti purutestaus

1. Pilotin lähtökohdat ja tavoitteet

KiertoKasvu-hankkeen pilotissa tutkittiin puutuoteteollisuuden sivuvirtoihin kuuluvan kutteripurun ja sahanpurun jalostamismahdollisuuksia uusiksi tuotteiksi. Pilotin tavoitteena oli selvittää, onko purusta mahdollista valmistaa muotoiltavia, mittapysyviä ja akustisesti toimivia kappaleita.

2. Seoskoheet, sidosaineet ja materiaalin käyttäytyminen

Pilotissa tutkittiin kolmea sidosainetta: puuliimaa, maitoliimaa ja tärkkelyspohjaista tapettiliisteriä. Kaikki seoskoheet valmistettiin samalla perusmenetelmällä, jotta sidosaineiden eroja voitiin arvioida luotettavasti.

Massan työvaiheet:

Ainesosien mittaaminen tilavuusyksiköillä:

Seokset valmistettiin tilavuussuhteilla, esimerkki määrät:

- **2 dl purua**
- **0,1–0,5 dl sidosainetta** (puuliima, maitoliima tai liisteri)
- **0–0,1 dl vettä** riippuen sidosaineesta ja purun kuivuudesta

Sidosaineen ja veden esisekoitus:

Puuliimaa/liisteri ja vesi sekoitettiin keskenään ennen puruun lisäämistä.

Maitoliiman kohdalla vettä lisättiin puruun, tämä varmisti tasaisen leviämisen ja ehjän rakenteen.

Massan sekoittaminen puruun:

Sidosaine lisättiin puruun pienissä erissä. Massa sekoitettiin, kunnes se oli tasaisen kostea ja muovautuva. Oikea koostumus havaittiin siten, että massa pysyi puristettaessa koossa, mutta ei ollut vetinen tai mureneva.

Muotin täyttö:

Muotit käsiteltiin mehiläisvahalla tai parafiiniöljyllä tarttumisen estämiseksi. Massa painettiin muottiin pienissä erissä ja tasattiin kevyesti. Testeissä käytettiin 3D-tulostettuja muotteja sekä suurille levyille rakennettuja puumuotteja.

Kuivuminen:

Muotti avattiin noin 6–12 tunnin kuluttua ja annettiin kuivua lisää. Pienet kappaleet kuivuivat 24–48 tunnissa, suuret levyt 2–5 vuorokaudessa.

2.1 Puuliimapohjaiset seokset

Kokeet aloitettiin MDF-levyjen tyypilliseen koostumukseen perustuvalla seoksella (92 % purua, 8 % puuliimaa). Seos osoittautui liian kuivaksi, eikä sideaine jakautunut tasaisesti. Veden lisääminen (5–15 %) paransi massan muovattavuutta ja tuotti selvästi tasalaatuisempia kappaleita.

Puuliimaseosten koostumukset:

1. Puru 92 % – puuliima 8 %
2. Puru 80 % – puuliima 15 % – vesi 5 %
3. Puru 70 % – puuliima 15 % – vesi 15 %

2.2 Maitoliimapohjaiset seokset

Maitoliimapohjaiset massat tarjosivat erittäin vahvan alkutartunnan. Valmistetut pienlevyt olivat tiiviitä mutta samalla joustavia, mikä soveltuu käyttökohteisiin, joissa tarvitaan elastisempaa rakennetta. Vesi lisättiin seoksissa puruun, ei liimaan, jotta sekoitus olisi tasaisempi.

Maitoliimaseosten koostumukset:

1. Puru 90 % – maitoliima 10 %
2. Puru 80 % – maitoliima 15 % – vesi 5 %

2.3 Liisteripohjaiset seokset

Tärkkelyspohjainen tapettiliisteri tuotti pintakovia mutta rakenteellisesti heikompia kappaleita. Se soveltuu parhaiten kevyisiin, ei-rakenteellisiin sovelluksiin.

Tapettiliisteriseoksen koostumus:

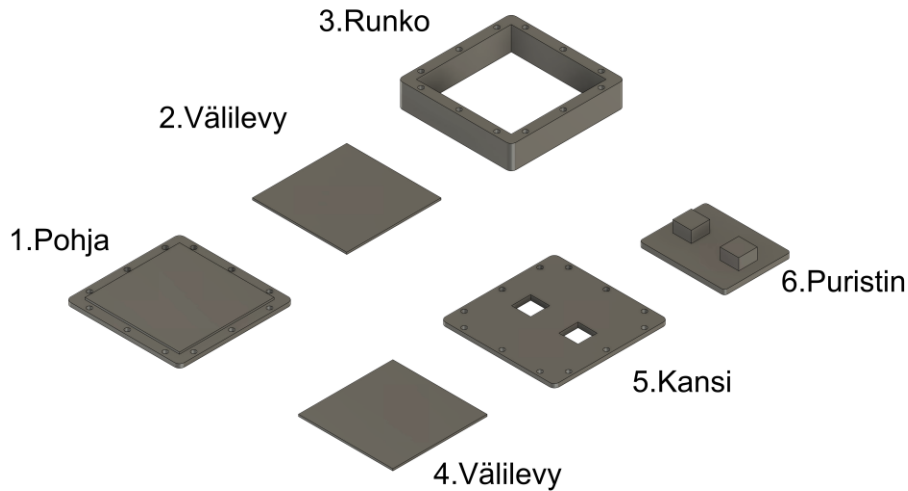
Puru 75 % – liisteri 25 %



Kuva: Puru, puuliima, vesi ja sekoitusämpäri

3. Kappaleiden valmistus

Kappaleiden valmistus aloitettiin 100 × 100 × 15 mm levyjen tuottamisella. Tätä varten suunniteltiin 3D-tulostettu, osittain puristusta mahdollistava muotti. Muotti koostuu kuudesta osasta ja se on kokonaan purettavissa. Kokoaminen tapahtuu M5-pulttien ja -mutterien avulla. Puristinosa sijoittuu muotin ulkopuolelle, ja siihen voidaan kohdistaa haluttu puristuspaino tai lisäpaino.



Kuva: 100 x 100 mm muotin osat



Kuva: Muotti ja liisteripuru

Työvaiheet 100 × 100 mm muotille:

1. Aseta pohja (1) ja runko (2) paikoilleen.
2. Käsittele muotin sisäpinnat massan tarttumisen estämiseksi.
3. Aseta välilevy (3) pohjalle.
4. Lisää massa muottiin; tarvittaessa tasoita käyttämällä välilevyä (4).
5. Aseta käsitelty välilevy (4) paikoilleen.
6. Aseta kansi (5) ja kokoa muotti M5-pulteilla.
7. Sijoita puristin (6) paikoilleen ja säädä haluttu puristuspaino tai -paino.

100 x 100 mm levyt

Puuliima 100 × 100 mm

Puru ja puuliima muodostavat toimivan yhdistelmän kiinteiden kappaleiden valmistukseen. Lopputuotteet ovat kovia ja muistuttavat ominaisuuksiltaan lastulevyä tai MDF-levyä.

Maitoliima 100 × 100 mm

Maitoliima on luonnonlateksipohjainen, joustava sidosaine, jolla on voimakas alkutartunta. Sen tasainen sekoittaminen on haastavampaa kuin puuliimalla tai liisterillä. Valmiit kappaleet ovat elastisia ja rakenteeltaan hieman sienimäisiä.

Tapettiliisteri 100 x 100 mm

Tärkkelyspohjainen tapettiliisteri on testin ekologisin ja luonnollisin sidosaine, Sen korkean kosteuspitoisuus edellyttää kuitenkin kappaleen huolellista kuivattamista homeriskin välttämiseksi.

Johtopäätökset:

Pienlevyjä hyödynnettiin alkuvaiheen testauksessa niiden yksinkertaisen geometrian vuoksi. Puuliimaseoksilla valmistetut levyt olivat tasalaatuisia ja mittapysyviä. Maitoliimaseoksilla syntyneet levyt olivat tiiviitä mutta joustavia. Liisteripohjaiset seokset muodostivat pintakovia, mutta rakenteeltaan hauraampia levyjä. Jauhetusta purusta valmistettu levy vastaa ulkonäöltään hyvin lastulevyä tai MDF-levyä.



Kuva: 100 x 100 mm vasemmalta oikealle: puuliima, jauhettu puru puuliima, maitoliima ja liisteri

Ruukkujen valmistus

Ruukkujen valmistusta testattiin kahdella eri muotilla: kulmikkaalla ja pyöreällä. Ruukut valmistettiin puru-puuliima-seoksesta. Jauhettu puru mahdollisti huomattavasti tarkemmat ja terävämmät kulmat.

Kulmikkaan muotin täyttäminen osoittautui geometrian vuoksi aluksi haastavaksi, mutta ensimmäisten koekappaleiden jälkeen saavutettiin siistejä ja muotonsa pitäviä lopputuloksia.



Kuva: kulmikas ruukkumuotti, purua ja puuliima

Johtopäätökset:

Testikappaleet osoittivat, että purumassa soveltuu valettavaksi erilaisiin muotoihin. Valmiit kappaleet olivat käyttökelpoisia, ja niiden pintaa voidaan viimeistellä ohennetulla puuliimalla, hartsilla tai maalilla. Materiaali on todennäköisesti myös värjättävissä lisäämällä väriainetta massaan valmistusvaiheessa.

Akustiikkalevyt

100 × 100 mm -koekappaleista saatujen tulosten perusteella päätimme testata myös 600 × 600 × 30 mm levyjen valmistusta. Muotit rakennettiin hyödyntämällä Varkauden Puun hukkalistoja (7 × 40 mm) muottirungon materiaalina, ja muotin ylä- sekä alapuolelle asennettiin pinnoitetut 10 mm OSB-levyt. Muottipinnat käsiteltiin parafiiniöljyllä massan tarttumisen estämiseksi.

Kooksi valittiin 600 × 600 × 30 mm, koska se vastaa yhtä yleisimmistä akustiikkalevyjen standardimitoista. Levyn mitat 600 × 600 × 30 mm tuottavat kokonais-tilavuudeksi 10,8 litraa.



Kuva: Liisteripohjainen massa muotissa

Puuliima akustiikkalevy:

Ensimmäinen akustiikkalevykokeilu toteutettiin purun ja puuliiman seoksella. Valmistukseen kului noin 15 litraa purua. Kuivumisvaihe eteni odotetun hitaasti, ja valitettavasti 48 tunnin kuivauksen jälkeen muotin kääntämisen yhteydessä levy rikkoutui muotin kaaduttua. Tämän vuoksi akustisia mittauksia ei voitu suorittaa.

Pienemmistä koekappaleista saadun kokemuksen perusteella voidaan kuitenkin todeta, ettei puuliima vaikuttanut lupaavimmalta sidosaineelta akustisiin käyttötarkoituksiin. Puuliima pohjainen levy on jäykempi ja kovempi rakenteeltaan ja siten ei todennäköisesti ole tehokas akustisilta ominaisuuksiltaan.

Tapettiliisteri akustiikkalevy:

Toisen levyn materiaaliksi valittiin purun ja tapettiliisterin seos. Valmistuksessa käytettiin noin 15 litraa purua ja 4 litraa liisteriä. Kuivatusvaiheessa muotti käännettiin 24 tunnin kuluttua pystyasentoon, jotta kuivuminen tapahtuisi tasaisesti molemmilta puolilta. Muotin annettiin kuivua yhteensä seitsemän vuorokautta. Sen jälkeen kosteusmittauksissa levyn kosteuspitoisuus vaihteli välillä 11–15 prosenttia.

Valmiin tuotteen mitat olivat 600 × 600 × 29 mm. Levy osoittautui rakenteeltaan suhteellisen jäykäksi ja huokoiseksi.

Maitoliima akustiikkalevy:

Kolmannen levyn valmistuksessa käytettiin purun ja maitoliiman seosta. Valmistukseen kului noin 15 litraa purua ja 1,2 litraa maitoliimaa. Sekoitusvaiheessa puruun lisättiin hieman vettä ennen liiman lisäämistä. Tämä vähensi maitoliiman erittäin voimakasta alkutartuntaa ja mahdollisti massan tasaisemman sekoittumisen.

Levyä kuivattiin 24 tuntia, minkä jälkeen muotti käännettiin ylösalaisin. Materiaalin joustavuuden vuoksi pystyasennossa kuivattamista ei kokeiltu. Kosteusmittaukset eivät olleet luotettavia, sillä maitoliimalla on sähköä eristäviä ominaisuuksia, jotka tekivät mittauksesta epäluotettavaa.

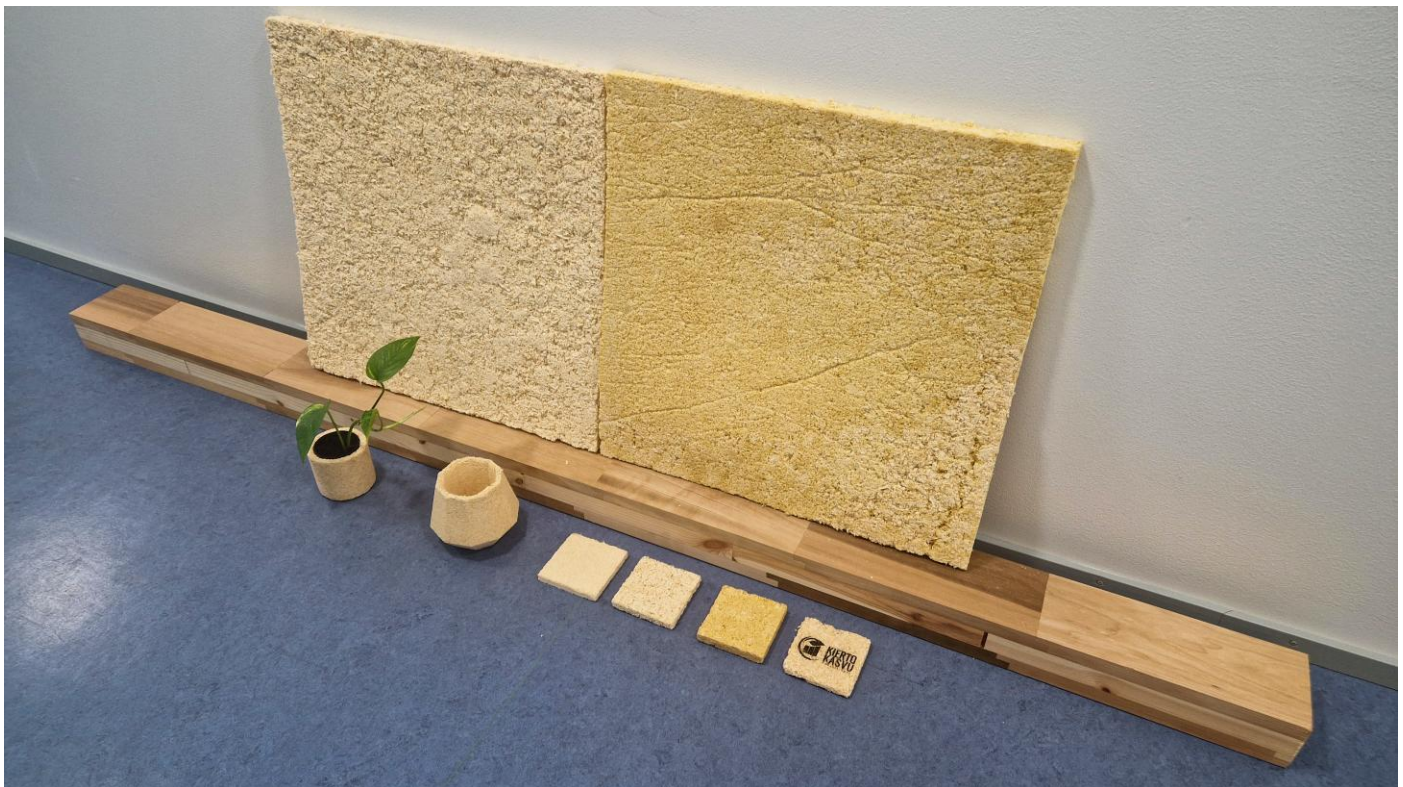
Valmis levy oli kooltaan 600 × 600 × 29 mm ja rakenteeltaan selvästi taipuisa ja pehmeän sienimäinen.

Johtopäätökset:

Akustiikkalevyt olivat pilotin suurimmat testikappaleet ja tarjosivat tärkeää tietoa prosessin skaalautuvuudesta. Kuivumisaika kasvaa huomattavasti kappaleen koon kasvaessa, lopputuloksena valmistui käyttökelpoisia akustiikkalevyprototyypppejä. Maitoliimaseos tuotti pehmeän ja joustavan levyn, liisteriseos kevyemmän mutta hauraamman lopputuloksen.

- **Rakenne oli kauttaaltaan huokoinen, mikä tukee äänenvaimennusominaisuuksia.**
- **Pinta oli kokonaisuutena yhtenäinen, mutta paikoin näkyi lieviä kuivumisen aiheuttamia kutistumajälkiä.**
- **Reuna- ja kulma-alueet pysyivät suorina, mikä kertoo muotin ja massan yhteensopivuudesta.**
- **Kappaleissa ei havaittu merkittävää delaminaatiota, mikä osoittaa, että sidosaineen määrä oli riittävä myös suuremmissa rakenteissa.**

Akustiikkalevyjen tulokset olivat lupaavia: materiaali pystyy muodostamaan suuria, mittapysyviä ja akustisesti toimivia pintoja, kun kuivauksen ja kosteuden hallinta on riittävä.



Kuva: Akustiikkalevyt, ruukut, 100 x 100mm levyt ja hukkapaloista valmistettu palkki

4. Akustiikkamittaukset

Puruakustiikkalevyjen arviointiin käytettiin huoneakustiikan jälkikaiunta-ajan mittausta (RT60) sekä taajuusvasteen muutosten tarkastelua (SPL). Mittaukset suoritettiin Room EQ Wizard -ohjelmistolla (REW), hyödyntäen ääni-impulssi-vasteen perusteella laskettavaa Topt-arvoa.

Menetelmä mahdollistaa sen tarkastelun, muuttaako testattava paneeli huoneen jälkikaiuntaa tai heijastusäänen määrää verrattuna lähtötilanteeseen. Paneelit asetettiin aina samaan ensiheijastuskohtaan, ja mikrofonin sekä kaiuttimen sijainnit pidettiin samoina kaikkien materiaalien kohdalla, jotta tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Menetelmä ei kuitenkaan vastaa ISO-354 standardin mittausta, mutta noudattaa samoja periaatteita kuin standardi. Tulos on huone- ja asettelusidonnainen vertailu (ei standardin mukainen absorptiokerroin)

Tällä menetelmällä voidaan mitata

- kuinka paljon paneeli lyhentää jälkikaiunta-aikaa (RT60)
- kuinka paljon paneeli vähentää heijastuksia tietyillä taajuuksilla (SPL-muutos)
- paneelien välisiä suhteellisia eroja saman huoneen sisällä

Näin saadaan luotettava suuntaa antava arvio siitä, onko testattavalla materiaalilla akustista vaikutusta.



Kuva: Mittaustilanne liisteripohjainen levy

Mittauksen parametrit:

Mittausohjelma: Room EQ Wizard

Huoneen mitat: noin. $4.5 \times 2.5 \times 2.6$ m

Mittauspiste: Huoneen toinen puoli (Kaiutin ja Mikrofoni vastakkaisilla puolilla)

Mittauslaite: Dayton Audio IMM-6 (kalibroitu)

Kaiutin: JBL Boombox 1

Kaiuttimen etäisyys seinästä 70 cm

Mikrofonin etäisyys seinästä 70 cm

Kaiutin ja mikrofoni 80 cm korkeudella lattiasta

Vertailtavat Akustiikkalevyt

Levy	Mitat	Materiaali
Kaupallinen Parafon Royal Viva	120 cm x 60 cm	Referenssimateriaali
Maitoliima	60 cm x 60 cm	Puru + Maitoliima
Liisteri	60 cm x 60 cm	Puru + Liisteri

RT60 Topt -analyysi (Jälkikaiunta-aika)

RT60-arvo (Reverberation Time 60 dB) kuvaa huoneen yleistä kaikuisuutta.

Taulukko esittää jäljelle jääneen RT60-ajan (s) levyn asennuksen jälkeen.

Pienempi luku = parempi vaimennus.

Taajuus (Hz)	Ei levyä (s)	Kaupallinen (s)	Maitoliima (s)	Liisteri (s)
250	0,409	0,391	0,409	0,409
500	0,342	0,323	0,317	0,336
1000	0,361	0,302	0,314	0,332
2000	0,387	0,317	0,332	0,351
4000	0,287	0,248	0,26	0,273

RT60 mittausten tulkinta

Kaupallinen akustiikkalevy tuottaa parhaan kokonaisvaimennuksen, eli matalimmat RT60-arvot, erityisesti taajuusalueella 1000 Hz ja sen yläpuolella. Sen suurempi fyysinen koko selittää osittain sen parempaa suorituskkyä.

Maitoliimapohjainen levy osoitti poikkeuksellisen hyvää vaimennuskkyä 500 Hz:n taajuudella, jossa sen RT60-arvo oli mittausten alhaisin (0,317 s). Tämä tekee siitä erityisen potentiaalisen vaihtoehdon akustiikkalevyksi.

Tapettiliisteripohjainen levy suoriutui heikoimmin koko kriittisellä taajuusalueella 500–4000 Hz.

EDT Topt -analyysi (Varhainen Vaimenemisaika)

EDT (Early Decay Time) kuvaa äänen vaimenemista aivan alkuhetkillä ja korreloi suoraan koetun selkeyden kanssa. Mitä pienempi arvo, sitä parempi äänen selkeys.

Taajuus (Hz)	Ei levyä (s)	Kaupallinen (s)	Maitoliima (s)	Liisteri (s)
125	0,477	0,466	0,466	0,467
250	0,409	0,391	0,397	0,406
500	0,336	0,323	0,312	0,322
1000	0,332	0,283	0,286	0,307
2000	0,361	0,28	0,284	0,296
4000	0,25	0,207	0,215	0,223

EDT Tulkinta

- **Kaupallinen levy** saavuttaa alhaisimmat EDT-arvot taajuuksilla 1000 Hz:stä ylöspäin, osoittaen tehokkuutta varhaisten korkeataajuisien heijastusten hallinnassa.
- **Maitoliimapohjainen levy** suoriutuu parhaiten 500 Hz:n taajuudella (0,312 s). Sen kyky vaimentaa keskitaajuuksien ensiheijastuksia on erinomainen, ja sen suorituskkyky on lähellä kaupallista levyä myös 1000 Hz:n ja 2000 Hz:n taajuuksilla.
- **Tapettiliisteriin perustuva levy** oli heikoin varhaisten heijastusten hallinnassa.

Yhteenveto (akustiikkamittaukset)

Yhden levyn kokonaisvaikutus huoneeseen on selkeästi mitattavissa:

1. **Kaupallinen levy** on kokonaisuutena tehokkain, parantaen sekä RT60- että EDT-arvoja merkittävästi. On huomioitava, että sen koko on kaksinkertainen purulevyihin verrattuna.
2. **Maitoliima-levy** on purupohjaisista vaihtoehdoista selvästi toimivin. Se kilpailee kaupallisen levyn kanssa ja ylittää sen suorituskyyvyn kriittisellä 500 Hz:n taajuusalueella.
3. **Liisteri-levy** on akustisilta ominaisuuksiltaan heikoin. Sen vaikutus jäi vähäiseksi, useamman levyn käyttö voisi parantaa tulosta.

Testikappaleiden fyysisen koon huomiointi

Koska Kaupallinen levy on kaksi kertaa suurempi pinta-alaltaan kuin testiä varten valmistetut levyt (0,72 m² vs. 0,36 m²), voidaan laskea normalisointi. Lasketaan levyn tehokkuuden neliömetriä kohti (s/m²) ja paljastaa materiaalin todellisen laskennallisen absorptiokyvyn.

$$\text{Normalisoitu } \Delta RT60 = \frac{RT60_{\text{Lähtö}} - RT60_{\text{Levy}}}{\text{Levyn pinta-ala (m}^2\text{)}}$$

Laskennan tulokset

Taajuus (Hz)	Kaupallinen (s/m ²)	Maitoliima (s/m ²)	Erotus	Maitoliima vs. kaupallinen (%)
500 Hz	0.026	0.069	+0.043	165 %
1000 Hz	0.082	0.131	+0.049	59.8 %
2000 Hz	0.097	0.153	+0.056	57.7 %

Normalisoidun analyysin tulkinta (kokoero huomioitu)

- **Puru + maitoliima on tehokkaampi kuin kaupallinen vertailukohde.** Sen materiaali on jopa 165 % tehokkaampi absorboimaan ääntä neliömetriä kohti verrattuna kaupalliseen levyyn.
- **Materiaalin valinta ratkaisee:** Maitoliiman käyttö purumassan sidosaineena on akustiikan kannalta paras valinta testatuista vaihtoehtoista.
- **Kahdella Maitoliima-levyllä** saavutettaisiin todennäköisesti parempi lopputulos kuin yhdellä Kaupallisella levyllä.

5. Yhteenveto ja päätelmät

Pilotin kokonaisuus osoitti, että puutuoteteollisuuden sivuvirroista (kutteripuru ja sahanpuru) on mahdollista valmistaa monipuolisia ja toimivia tuotteita, kun seos ja valmistusprosessin keskeiset parametrit löytyvät. Kokeiden perusteella voidaan tehdä seuraavat päätelmät:

- Puru on teknisesti potentiaalinen uusiomateriaali, kun sen kosteus, raekoko ja sidosainepitoisuus säädetään oikein.
- Puuliima tuotti mekaanisesti vahvimmat ja mittapysyvät kappaleet, mikä tekee siitä potentiaalisen vaihtoehdon rakenteellista lujuutta vaativiin sovelluksiin.
- Maitoliima mahdollisti tiiviin mutta joustavan rakenteen, mikä sopii käyttökohteisiin, joissa materiaalin jousto on eduksi.
- Tärkkelyspohjainen tapettiliisteri toimi kevyissä ratkaisuisissa, mutta ei tarjonnut yhtä suurta lujuutta kuin muut sideaineet.
- 3D-tulostetut muotit osoittautuivat tehokkaaksi työkaluksi massan muotoiltavuuden testaamisessa ja valmistuksen varhaisessa kehittämisessä.
- Tulokset purun käytöstä akustiikkalevyjen valmistukseen olivat lupaavia. Valmistus toi esiin kuivausprosessin kriittisyyden ja tarpeen kontrolloidummille olosuhteille.
- Materiaalin huokoisuus ja partikkelikoko ovat keskeisiä akustisissa sovelluksissa, joissa tasapaino lujuuden ja äänenvaimennuskyvyn välillä on löydettävä lopullisen tuotteen valmistusta varten.

Kaupallisen tuotannon käynnistäminen vaatii tuotantoprosessin vakiointia, erityisesti sekoituksen, puristamisen ja kuivauksen osalta. Kokonaisuutena pilotin tulokset osoittavat, että purupohjaisilla komposiiteilla on potentiaalia kehittyä varteenotettavaksi uusiomateriaaliksi, jolla voidaan korvata neitseellisiä tai fossiilipohjaisia ratkaisuja erityisesti sisustustuotteissa, akustiikkapaneeleissa ja muotoilluissa ei-kantavissa rakenteissa. Materiaalilla on myös lämmöneristysominaisuuksia, jotka voivat tukea tuotteistamista.



Kuva: mallinnuskuva purulevyistä toimiston seinällä

Materiaalit ja linkit

Testaukseen liittyviä

MDF ja Lastulevy tietoa Peda.net: <https://peda.net/p/marlaht/saha-levy-ja-puutuotteiden-valmistus/puunty%C3%B6st%C3%B6koneet/mdf-ja-lastulevy>

ISO-354 standardi: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/3/13506.html.stx>

Room EQ Wizard ohjelmiston ohjeet: <https://www.roomeqwizard.com/help.html>

Mittaukseen liittyvä artikkeli: <https://archimago.blogspot.com/2015/08/measurements-room-acoustic-absorption.html>

Liimat

Erikeeper Plus D3 puuliima tuotesivu: <https://www.erikeeper.fi/fi/erikeeper-plus-tuotetiedot>

Tetrakem Maitoliima tuoteseloste: <https://fintex.fi/wp-content/uploads/2017/08/FT-maitoliima.pdf>

Cello tapettiliisteri tuotekortti: https://docs.keskofiles.com/f/btt/ASSET_PDF_24480208

KiertoKasvu-hanke

KiertoKasvu-hankkeen hankesivut: www.kiertotaloudella.fi

Navitas Yrityspalveluiden KiertoKasvu-hankesivu: <https://navitas.fi/kiertokasvu>