

# PUUKUIDUN HIENORAKENTEEEN VAIKUTUS VAAHTORAINATTUJEN ÄÄNENVAIMENNUSMATERIAALIEN AKUSTISIIN OMINAISUUKSIIN

Jose Cucharero<sup>1,2\*</sup>, Kari Kammiovirta<sup>1</sup>, Tapio Lokki<sup>2</sup>, Tuomas Hänninen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lumir Oy, Tammiston kauppatie 22, 01510 Vantaa

<sup>2</sup> Aalto Acoustics Lab, Informaatio- ja tietoliikennetekniikan laitos, Sähkötekniikan korkeakoulu, Aalto-yliopisto, 00076 Aalto, Espoo

<sup>3</sup> Paptic Oy, Tekniikantie 4C, 02150 Espoo

jose.cuchareromoya@lumir.fi

## Tiivistelmä

3D-kuituverkkojen äänenvaimennusominaisuudet riippuvat pääasiassa niiden rakenteen huokoisuudesta. Tärkeimmät vaikuttavat tekijät ovat valmistustekniikka ja raakakuitujen ominaisuudet. Tässä tutkimuksessa on paneuduttu puukuitujen hienorakenteen vaikutukseen vaahtorainatekniikalla valmistettujen kuituverkostojen äänenabsorptio-ominaisuuksiin. Makroskooppisella tasolla 3D-kuituverkon huokoinen rakenne määrää vaahtorainatun materiaalin äänenvaimennusominaisuudet. Mikroskooppisella tasolla kuidun epäsäännöllinen morfologia, huokoisuus ja mitat määräävät vaahtorainatun materiaalin makroskooppisen huokoisen rakenteen. Molekyylitasolla puun rakennepolymeerit ja niiden sijoittuminen soluseinään ovat ratkaisevia kuitujen materiaaliominaisuuksien määrittelyssä.

Tulokset viittaavat siihen, että puukuitujen jatkokäsittely, pienemmät kuitumitat ja joustavammat kuidut parantavat vaahtorainattujen puukuitupohjaisten materiaalien äänenvaimennusominaisuuksia. Tulosten perusteella vaahtorainatut puukuitupohjaiset materiaalit voivat tarjota yhtä hyvät absorptio-ominaisuudet kuin perinteiset vaimennusmateriaalit. Lisäksi puukuitupohjaiset materiaalit vähentävät ilmakehän hiilidioksidia sitomalla CO<sub>2</sub>:ta rakennuksiin materiaalin käyttöiän aikana.

## 1 JOHDANTO

Yleisen mielipiteen vaatiessa toimia ilmastokriisin välttämiseksi, perinteisten akustisten materiaalien rinnalla on yhä enemmän kysyntää vähähiilisille vaihtoehdoille. Tässä mielipideympäristössä puukuitujen käyttö olisi ympäristöystävällinen vaihtoehto vaimennusmateriaalien valmistukseen. Puukuidut ovat uusiutuvia, kierrätettäviä, biohajoavia ja mikä tärkeintä, ne toimivat hiilinieluina. Puukuitujen hienorakenteen vaikutuksen syvämpi ymmärtäminen äänenvaimennuksen kannalta on haaste, johon on vastattava puukuitupohjaisten vaimennusmateriaalien optimoinnissa.

---

Copyright ©2023 Jose Cucharero, Kari Kammiovirta, Tapio Lokki, Tuomas Hänninen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Kuitujen dimensioiden tiedetään vaikuttavan huokoisten vaimennusmateriaalien ominaisuuksiin [1]. Tämän lisäksi kuitujen joustavuuden on raportoitu vaikuttavan huokoisten materiaalien kykyyn vaimentaa äänienergiaa, pääasiassa matalilla taajuuksilla [2]. Puukuiduissa pituus ja leveys vaihtelevat huomattavasti eri puulajeilla. On myös osoitettu, että jopa rungon osan, josta kuidut erotetaan vaikuttavat kuitujen ominaisuuksiin [3].

Puukuidut orgaanisena materiaalina ovat alttiita ilmankosteuden vaikutukselle. Puukuidun sitoessa vesimolekyylejä itseensä, tapahtuu muutoksia niin kuidun pinta-alassa, tilavuudessa, sisäisessä rakenteessa kuin myös mekaanisissa ja kemiallisissa ominaisuuksissa [4]. Vesipitoisuuden kasvaminen saa kuidut turpoamaan varsinkin kuidun paksuussuunnassa. Turpoamisen lisäksi kosteuden sitoutuminen kuituihin saa aikaan kuitujen elastisuuden lisääntymisen [5].

Tässä tutkimuksessa valmistettiin eri sellulaatujen huokoisia vaimennusmateriaaleja vaahdorainaustekniikan avulla. Selluvaahtojen absorptio-ominaisuudet mitattiin impedanssi-putkella. Tutkimuksessa tutkittiin eri sellukuitujen morfologian ja kemiallisen koostumuksen vaikutusta äänenabsorptioon. Lisäksi tutkimuksessa tutkittiin kosteuden vaikutusta sellukuitujen dimensioihin ja mekaanisiin ominaisuuksiin ja puolestaan näiden vaikutusta selluvaahtojen äänenvaimennukseen.

## **2 MATERIAALIT JA MENETELMÄT**

### **2.1 Materiaalit ja näytteiden valmistus**

Tutkimuksen raaka-aineina käytettiin erilaisia sellulaatuja, jotka toimitettiin suomalaisilta sellutehtailta. Sellusta valmistettiin vaahdorainaustekniikalla huokoisia vaimennusmateriaaleja. Materiaalivalmistus tehtiin mukailen aiemmin esitettyä menetelmää [6]. Vaahdorainauksessa sellukuitususpensioon lisätään saippuaa ja seosta vaahdotetaan sekoittamalla. Vaahdotettaessa kuidut tarttuivat ilmakuplien pinnoille. Märkä kuituvaahdo kaadetaan muottiin ja kuivataan huoneenlämmössä lämpimän ilmavirran avulla. Kuituvaahdon kuivuessa muodostuu 3D-kuituverkosto. Näytteiden haluttiin olevan mahdollisimman homogeenisiä, joten selluvaahdoista poistettiin ylä- ja alapinta, sillä niissä kuidut olivat pakkaantuneet tiiviimmin kuin näytteen keskellä.

### **2.2 Kuidun kemiallinen koostumuksen ja morfologian vaikutus äänen absorptioon**

Tutkimuksessa mitattiin eri sellulaatujen kemiallinen koostumus ja kuidun morfologia (kuidun pituus, leveys ja seinämän paksuus) sekä tutkittiin niiden vaikutusta selluvaahtojen äänenabsorptioon. Tutkimuksen raaka-aineina käytettiin sulfaattihavusellua, sulfaattilehtipuusellua, havuliukosellua ja lehtipuuliukosellua. Molempia sulfaattiselluja oli kolmea eri valkaisutasoa: valkaisuaton sellu, happivalkaistu sellu ja täysin valkaistu sellu. Liukoselluja oli kahta erilaista, havuliukosellu ja lehtipuuliukosellu. Tutkimusta varten valmistettiin 50 mm, 38 mm ja 28 mm paksuisia näytteitä ja tiheydet eri sellulaatujen välillä pyrittiin pitämään samana.

### 2.3 Kosteuden vaikutus puusellukuitujen äänenabsorptioon

Tutkimuksessa valmistettiin selluvaahdot ja näytteet altistettiin vaihteleville suhteellisille ilman kosteuksille (0 %, 10 %, 32 %, 75 %, 99 %) 2 päivän ajaksi. Tämä aika riitti saavuttamaan tasapainokosteuden materiaalissa. Näytteet kuivattiin ensin yön yli 80 asteessa ja niiden absorptio-ominaisuudet mitattiin heti kuivauksen jälkeen. Heti mittauksen jälkeen samat näytteet altistettiin 10 % suhteelliselle kosteudelle 2 päivän ajaksi. Tämä prosessi toistettiin kaikille tutkituille suhteellisille kosteuksille. On huomioitava, että näytteet olivat koko ajan halutussa ilmankosteudessa, paitsi mittausten aikana. Mittaukset kestivät maksimissaan muutaman minuutin. Tutkimusta varten valmistettiin 6 cm:n paksuisia näytteitä eri tiheyksillä.

## 3 TULOKSET JA POHDINTOJA

### 3.1 Kuidun kemiallisen koostumuksen ja morfologian vaikutus äänen absorptioon

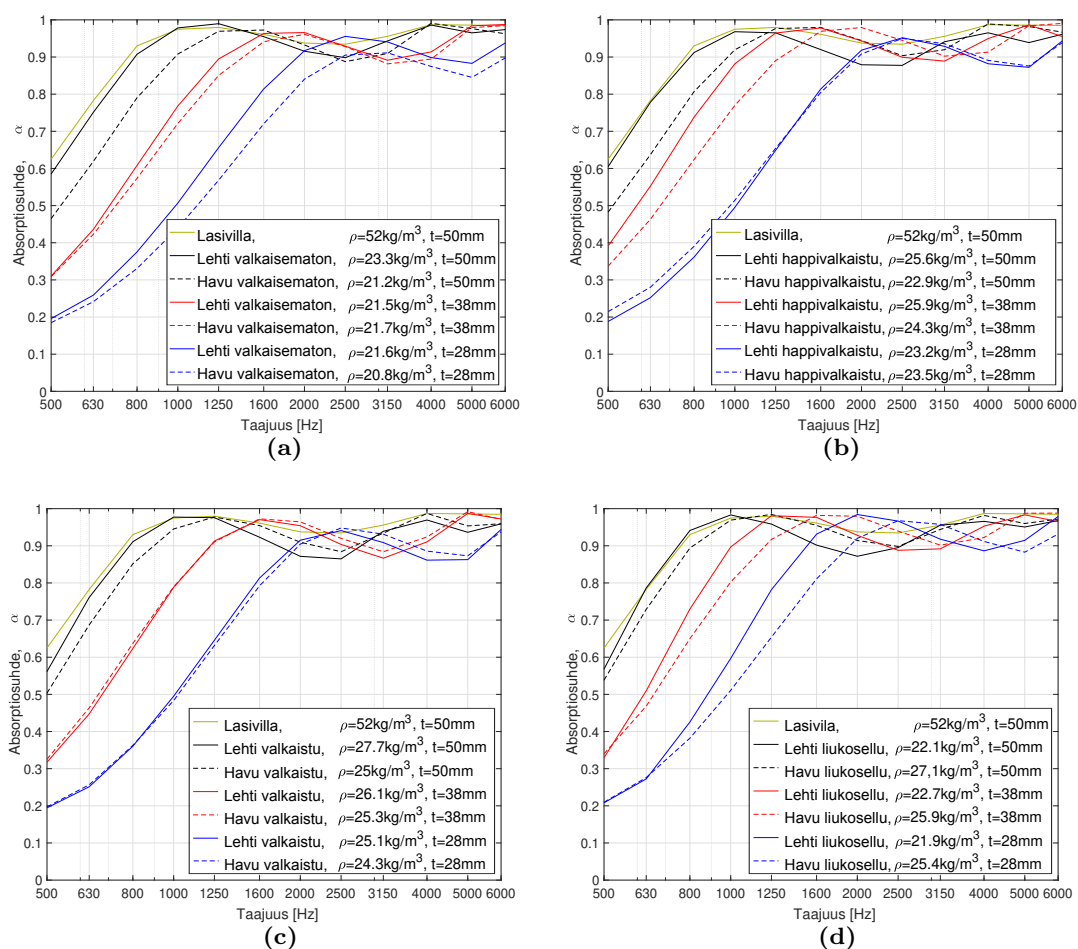
Taulukossa 1 on esitetty tutkittujen puusellukuitujen kemiallinen koostumus ja morfologia. Havuselluissa on enemmän ligniiniä ja vähemmän hemiselluloosaa kuin lehtipuuselluissa. Hemiselluloosa ja varsinkin ligniinin osuus vähenee mentäessä sellunvalmistusprosessissa eteenpäin, eli eniten ligniiniä on valkaisuasteissa selluissa ja ligniinin määrä vähenee selkeästi happivalkaisun ja lopullisen valkaisun myötä. Liukosellujen selluloosapitoisuus on yli 90 % ja niiden hemiselluloosapitoisuus on merkittävästi pienempi kuin muiden sellujen.

Fiberlab-laitteella mitattiin kuidun pituus, leveys ja kuidun seinämän paksuus sekä kuitujen kappalemäärä/mg. Taulukosta 1 nähdään, että lehtipuiden kuidun pituus on lähellä yhtä millimetriä ja havupuilla kuidun pituus on hieman yli kaksi millimetriä. Lehti- sekä havupuuselluilla kuidun pituus, leveys ja seinämän paksuus laskevat kuitujen ligniini- ja hemiselluloosapitoisuuden pienentyessä.

Kuva 1 esittää eri sellulaatujen vaahtojen mitatut absorptiokertoimet terssikaistoittain kolmella eri näytteen paksuudella. Vertailun vuoksi kuvassa 1 on myös esitetty kaupallisen lasivillan mitatut absorptiokertoimet (ominaisvirtausvastus  $23000 \text{ Nsm}^{-4}$ ). Kuvaajista nähdään selvästi, että yleensä lehtipuuselluvaahdoilla on suuremmat absorptiokertoimet kuin havupuuselluilla kaikilla näytteiden paksuuksilla. Varsinkin lehtiliukoselluvaahdoilla absorptiokertoimien käyrien ensimmäinen huippu löytyy selvästi matalemmilla

Sellulajit	Kuitu/mg (kpt/mg)	Kuidun pituus (mm)	Kuidun leveys ( $\mu\text{m}$ )	Kuidun seinämä (%)	Selluloosa (%)	Hemiselluloosa (%)	Ligniini (%)
Lehtivalkaisematon	12600	0.96	20.03	6.27	67.0	29.3	3.7
Lehtihappivalkaistu	14400	0.86	20.28	5.97	68.8	28.9	2.3
Lehtivalkaistu	12600	0.80	20.71	6.02	70.2	28.8	1.0
Lehtiliukosellu	19700	0.73	16.32	4.05	93.9	5.4	0.7
Havuvalkaisematon	5300	2.11	28.31	8.51	73.7	18.7	7.6
Havuhappivalkaistu	5800	1.88	27.49	7.98	76.4	19.9	3.8
Havuvalkaistu	5400	1.97	25.36	7.03	82.7	16.5	0.9
Havuliukosellu	5900	1.73	23.83	6.38	92.5	6.7	0.8

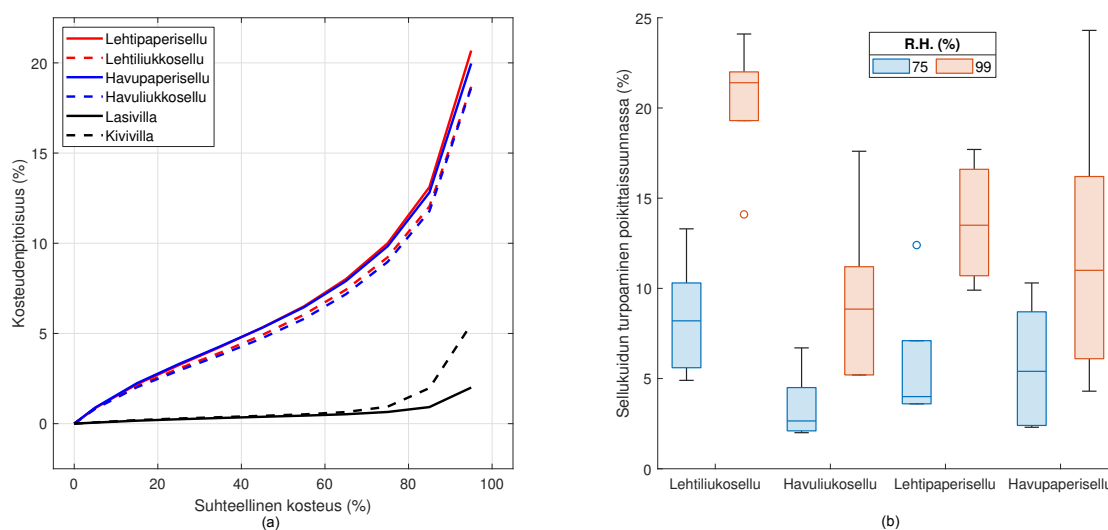
Taulukko 1: Tutkittujen sellutyypin morfologia ja kemiallinen koostumus.



Kuva 1: Tutkittujen sellulajien vaahtojen mitatut absorptiokertoimet terssikaistoittain kolmella eri näytteen paksuudella (50 mm, 38 mm, and 28 mm) [6]: (a) valkaisuaton lehti- ja havusellu, (b) happivalkaistu lehti- ja havusellu, (c) valkaistu lehti- ja havusellu sekä (d) lehti- ja havuliukosellu. Vertailun vuoksi 50mm kaupallisen lasivillan mitatut absorptiokertoimet on myös esitetty.

taajuuksilla kuin havuliukosellulla, vaikka lehtiliukosellunäytteiden tiheydet ovat selvästi pienempiä kuin havuliukosellunäytteillä. Verrattuna valkaisuattomiin sellunäytteisiin liukosellun äänenabsorptio oli selkeästi parempi.

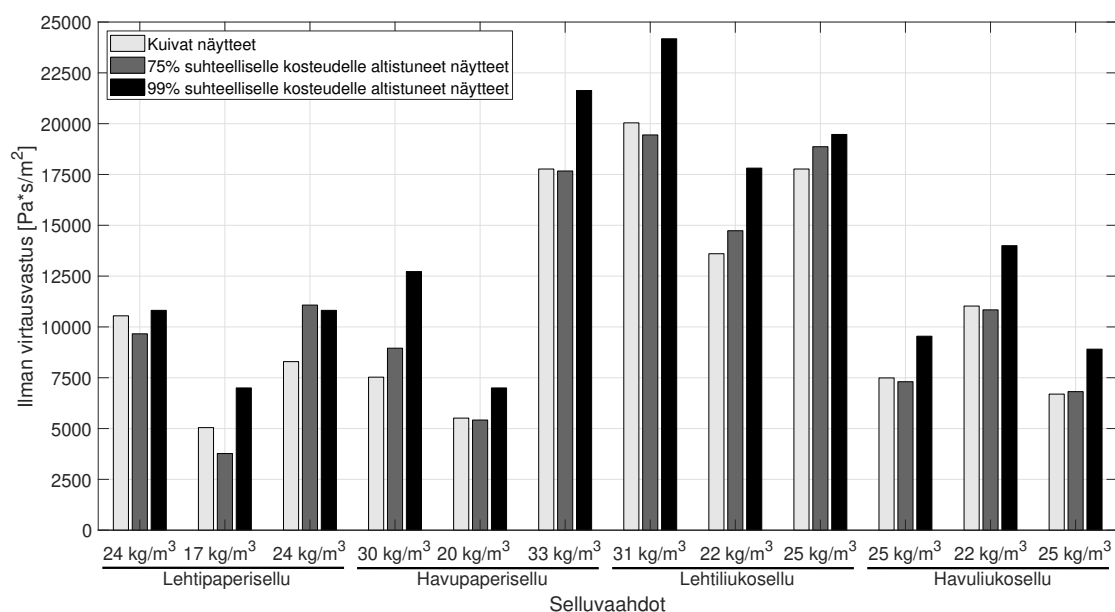
Kuitujen ligniini- ja hemiselluloosapitoisuuden pienentyessä sekä lyhyemmät että ohuemat kuidut siirtävät absorptiokäyrien ensimmäistä huippua kohti matalampia taajuuksia. Tämä johtuu siitä, että yksikkötilavuuden täyttävien kuitujen määrä kasvaa kuitujen mittojen pienentyessä, mikä johtaa mutkikkaampiin huokosiin rakenteisiin ja huokosten sisäpintojen kasvamiseen, joiden kautta äänienergia vaimentuu.



Kuva 2: Lehti- ja havupaperisellun sekä lehti- ja havuliukosellun adsorptioisotermit (vasemmalla) ja kuidun turpoaminen (oikealla). Lainattu [7]

### 3.2 Kosteuden vaikutus puusellukuitujen äänenabsorptioon

Kuvassa 2a on esitetty DVS-laitteella mitatut lehti- ja havupuun paperi- ja liukosellu-vaahtojen adsorptio-ominaisuudet (adsorptioisotermit), eli kosteuden imeytyminen kun sellu altistetaan ilmankosteuden vaihteluille. Lasi- ja kivikuitujen adsorptioisotermit ovat myös esitetty kuvassa 2 vertailun vuoksi. On ilmeistä, että kosteuden vuorovaikutus lasi- ja kivikuitujen kanssa on paljon vähäisempää kuin puusellukuiduilla. Lasi- ja kivi-kuidut imevät kosteutta kun ilman suhteellinen kosteus on yli 75% - 85%. Testatut lasi- ja kivikuidut kerättiin kaupallisista tuotteista, joten kuitujen pintaan kiinnitetty sideaine myös vaikuttaa kosteuspitoisuuteen [8].

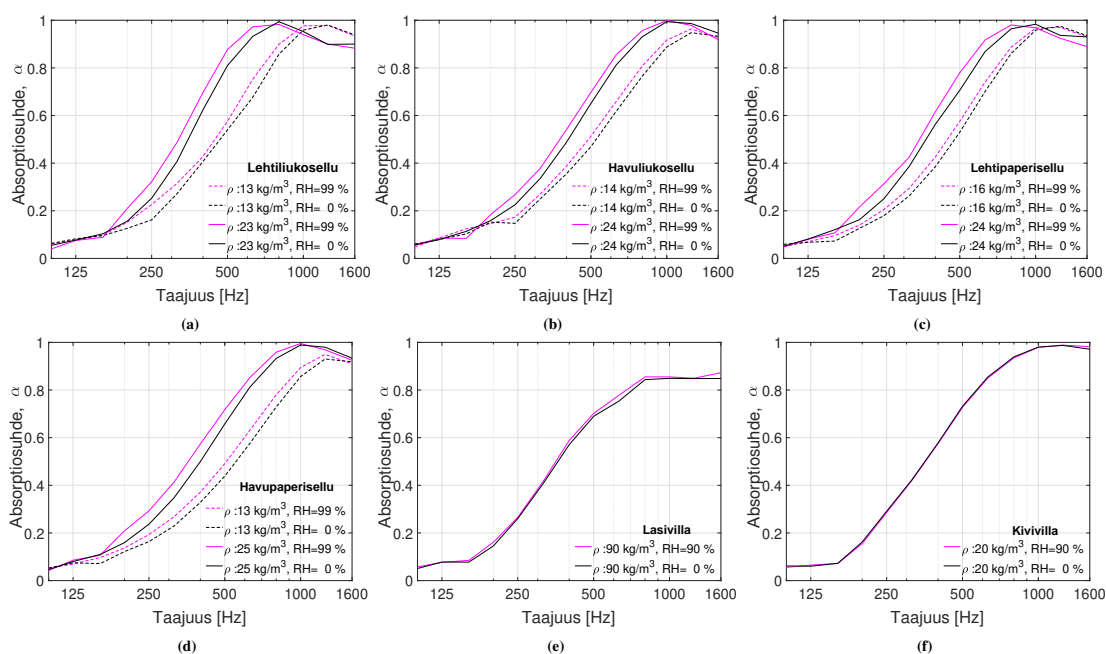


Kuva 3: Sellukuitujen mitattu spesifinen ilman ominaisvirtausvastusarvo kuivilla vaahdoilla sekä 75 % and 99 % suhteelliselle kosteudelle altistuneilla vaahdoilla [7].

Toisin kuin lasi- ja kivikuidut, puusellu alkaa adsorboida kosteuta heti, kun suhteellinen kosteus nousee yli 0%. Kuvaajasta nähdään, että paperisellu adsorboi hieman enemmän kosteutta kuin liukosellu. Tämä johtuu siitä, että paperisellulla hemiselluloosapitoisuus on suurempi ja mitä suurempi hemiselluloosapitoisuus on sitä suurempi saavutettavien hydroksyyliyhdyntien määrä on. Tämä parantaa sellukuitujen hygroskooppisuutta.

Kuvassa 2b on esitetty polarisaatiomikroskoopilla mitatut eri selluvaahtojen kuitujen turpoamisen arvot kuidun kosteuspuiteisuuden kasvaessa. Tulokset osoittavat, että kun sellukuidut altistettiin suhteelliselle kosteudelle 75 %, kaikki sellukuidut turposivat poikkitaissuunnassa noin 3 - 8 %. Kun kuidut altistettiin suhteelliselle kosteudelle 99%, sellukuidut turposivat noin 10 - 23%. Kuvassa 2b voidaan myös havaita, että lehtisellukuidut turpoavat enemmän kuin havusellukuidut. Tämä voidaan selittää lehtipuukuitujen yleisesti alhaisemmalla mikrofibrillikulma-arvolla havupuukuituihin verrattuna [9].

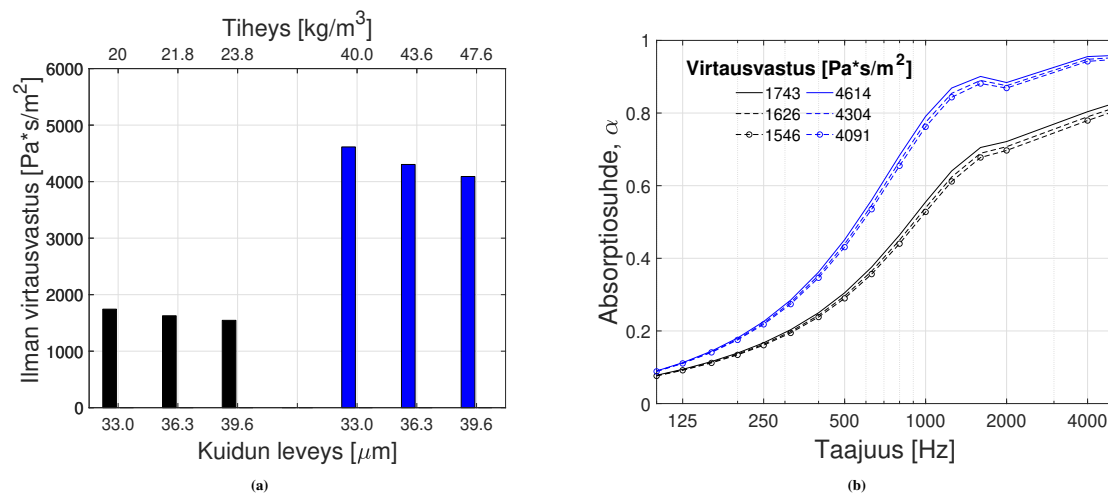
Kuvassa 3 on esitettyä kuivien sekä 75 % ja 99 % suhteelliselle kosteudelle altistuneiden paperisellu- ja liukoselluvaahtojen mitatut ilman ominaisvirtausvastusarvot. Tulokset osoittavat, että yleensä ilman virtausvastus kasvaa näytteiden tiheyden kasvaessa. Poikkeus löytyy havuliukosellu näytteistä, joiden pienimmällä näytteen tiheydellä ( $22 \text{ kg/m}^3$ ) saavutetaan suurin virtausvastus. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että näyte ei ole täysin homogeeninen ja sen sisällä on tiheämpiä kuitukerroksia. Kuvaajasta nähdään selvästi, että lehtiliukoselluvaahtojen ilman virtausvastukset ovat kaikilla näytteen tiheyksillä suurempia verrattuna muihin selluvaahtoihin. Nämä tulokset ovat yhdenmukaisia aiemman osion tulosten kanssa, joissa lehtiliukosellun vaahtojen äänenabsorptio matalimmilla taajuuksilla todettiin olevan tehokkaampi.



Kuva 4: Lehti- ja havupuun paperiselluvaahtojen, lehti- ja havupuun liukoselluvaahtojen sekä lasi- ja kivivillan mitatut absorptiokertoimet terssikaistoittain. Materiaalit mitattiin kuivina sekä 99 % suhteelliselle kosteudelle altistuneina. Selluvaahtojen ja kivivillan paksuus oli 6 cm ja lasivillan paksuus oli 4 cm [7].

Verrattuna kuivien vaahtojen virtausvastukseen 75 %:n suhteelliselle kosteudelle altistuneilla vaahtoilla selkeitä trendejä virtausvastuksen muutoksissa ei havaittu. 99 % suhteelliselle kosteudelle altistuneilla vaahtoilla ilman virtausvastuksen havaittiin kasvavan verrattuna kuivien selluvaahtojen virtausvastukseen. Tulokset osoittavat, että sellukuitujen kosteuspitoisuuden kasvu johtaa vaahtojen ilman virtausvastuksen lisääntymiseen. Tämän ilmiön täytyy johtua jostakin seuraavista tekijöistä: 1) näytteen huokoisen rakenteen muutokset kuidun turpoamisen takia, 2) kuitujen painon lisääntymisestä; ja/tai 3) kasvavasta kuidun elastisuudesta.

Kuvassa 4 on esitettyä lehti- ja havupuun paperiselluvaahtojen, lehti- ja havupuun liukoselluvaahtojen sekä lasi- ja kivivillan mitatut absorptiokertoimet terssikaistoittain kuivina sekä 99 % suhteelliselle kosteudelle altistuneina. Kuvaajasta nähdään selvästi että kaikilla selluvaahdoilla absorptiokertoimien arvot paranevat keski- ja matalilla taajuuksilla kosteuspitoisuuden kasvaessa. Parannus on lähes yhtä suuri kaikilla selluvaahdoilla ja on suurimmillaan noin 5 - 10 % kuivien selluvaahtojen ja 99 % suhteelliselle kosteudelle altistuneiden selluvaahtojen välillä. Toisin kuin selluvaahdoilla, lasi- ja kivivillan absorptiokertoimien arvot eivät osoita muutoksia vaihtelevissa ilman kosteusolosuhteissa. Tämä johtuu lasi- ja kivivillan luontaisesta hydrofobisuudesta.



Kuva 5: Mallinnettu ilman virtausvastus ja äänen absorptio MI mallin mukaisesti [7].

Tässä tutkimuksessa Garain ja Pompolin kehittämää empiiristä mallia (MI malli [10]) käytetään niin, että voidaan ennustaa polyesterikuitupohjaisten huokoisten materiaalien absorptio ja virtausvastus kun polyesterikuidut kokevat samoja ilmiöitä kuin sellukuidut kosteuspitoisuuden kasvaessa. MI malli tarvitsee kolme huokoisen materiaalin toimivuutta kuvaavaa parametria: näytteen paksuus, kuidun halkaisija ja näytteen tiheys. Kuvassa 5 on esitetty absorptio ja virtausvastuksen ennustukset kun kuidun halkaisija ja näytteen tiheys kasvavat. Kuvaajasta nähdään, että virtausvastus ja absorptiokertoimet pienenevät kuidun halkaisijan ja näytteen tiheyden kasvaessa. Tämä on ristiriidassa aiemmin selluvaahdoille esitettyjen tulosten kanssa, sillä selluvaahtojen virtausvastus ja absorptiokertoimet kasvavat sellukuidun halkaisijan ja näytteen tiheyden kasvaessa. Tämän ristiriidan pohjalta voidaan todeta, että näytteen tiheyden ja kuidun halkaisijan lisäksi tarvitaan ainakin yksi lisäparametri joka vaikuttaa selluvaahtojen vaimennusomi-

naisuuksiin. Lisäksi tämän tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että kuidun joustavuus on osittain vastuussa sellukuitujen äänen absorptiosta.

#### 4 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esitämme tutkimuksia sellukuitujen hienorakenteen vaikutuksesta selluvaahtojen äänenabsorptioon. Tulokset osoittavat, että ohuemmillä ja pienemmillä kuiduilla saavutetaan tehokkaampi äänenabsorptio. Kosteuden todettiin vaikuttavan selluvaahtojen äänenabsorptioon keski- ja matalilla taajuuksilla. Tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että selluvaahtojen äänenabsorption parantuminen kosteuden kasvaessa johtuu kolmesta tekijästä: näytteen tiheyden lisääntymisestä, kuidun turpoamisesta ja kuidun joustavuuden kasvusta.

#### VIITTEET

- [1] N Voronina. Acoustic properties of fibrous materials. *Appl Acoust*, 42(2):165–174, 1994.
- [2] K. Attenborough. The influence of microstructure on propagation in porous fibrous absorbents. *J Sound Vib*, 16(3):419 – 442, 1971. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90597-9](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90597-9).
- [3] Johan Gullichsen, Hannu Paulapuro, and Per Stenius. Forest products chemistry. *Fapet Oy*, 2000.
- [4] P.A. Tydeman, D.R. Wembridge, and D.H. Page. Transverse shrinkage of individual fibres by micro-radiography. In *Consolidation of the Paper Web, Trans. of the 3rd Fund. Res. Symp. Cambridge.*, pages 119–144. 1965.
- [5] Leopold Wagner, Clémence Bos, Thomas Karl Bader, and Karin De Borst. Effect of water on the mechanical properties of wood cell walls-results of a nanoindentation study. *BioResources*, 10(3):4011–4025, 2015.
- [6] Jose Cucharero, Sara Ceccherini, Thad Maloney, Tapio Lokki, and Tuomas Hänninen. Sound absorption properties of wood-based pulp fibre foams. *Cellulose*, 28(7):4267–4279, 2021.
- [7] Jose Cucharero, Awais Muhammad, Kari Kammiovirta, Lauri Rautkari, Tapio Lokki, and Tuomas Hänninen. Influence of moisture on the sound absorption properties of wood-based pulp fibre foams. (lähetetty vertaisarviointiin). *Materials Today Sustainability*, 2023.
- [8] Laurent Marmoret, Florence Collet, and Hassen Beji. Moisture adsorption in glass wool products. *High. Temp. High. Press.*, 40(1):31–46, 2011.
- [9] Martina Lindner. Factors affecting the hygroexpansion of paper. *J. Mater. Sci.*, 53(1):1–26, 2018.
- [10] Massimo Garai and Francesco Pompoli. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Appl Acoust*, 66(12):1383–1398, 2005.