

# RAKENTEELLISTEN BIOKOMPOSIITTIIEN VIBROAKUSTIIKASTA

**Jukka Tanttari**

VTT  
PL1300, Visiokatu 4  
33101 TAMPERE  
etunimi.sukunimi@vtt.fi

## Tiivistelmä

Rakenteellinen biokomposiitti on kiinteä materiaali, joka on tarkoitettu mekaanista kuormaa kantaviin osiin, komponentteihin ja rakenteisiin. Biokomposiittirakenteiden vibroakustisia ominaisuuksia, esimerkiksi ilmaääneneristävyyttä tai runkoäänen vaimennusta, on vielä tutkittu melko vähän. Tässä kirjoituksessa käydään läpi kyseisten rakenteiden vibroakustisia perusasioita, profiloidaan materiaaleja verrattuna muihin materiaaleihin sekä sivutaan viskoelastisten ominaisuuksien merkitystä. Lopuksi demonstroidaan simulointiesimerkein erään biokomposiitin vibroakustista suorituskykyä verrokkimateriaaleihin nähden kahdessa tyypisovelluksessa.

## 1 JOHDANTO

Kestävän kehityksen haasteita pyritään ratkaisemaan muun muassa uusilla materiaaleilla. Eräs kiinnostava materiaalityyppi on rakenteellinen biokomposiitti (jatkossa ”biokomposiitti”), jossa yhdistetään luonnosta peräisin olevia partikkeleita tai kuituja muihin materiaaleihin, kuten fossiilisiin tai - yhä useammin - biopohjaisiin muoveihin. Biokomposiiteille on visioitu, ja osin toteutettukin, käyttökohteita aterimista huonekalujen kautta kuljetusvälineisiin [1]. Kotimaisista biokomposiiteista mainittakoon UPM (UPM Formi -tuoteperhe, PP- tai PLA-matriisi, 20...50 % selluloosakuitua) sekä Stora Enso (DuraSense -tuoteperhe, 30 – 55 % puupohjaista kuitua, ”fossiilinen tai biopohjainen matriisi”). Maailmalla suosittuja kuituja ovat myös mm. pellava, sisal, hamppu ja sienikurkku eli luffa.

Biokomposiittien vibroakustisia ominaisuuksia ja käyttöä esimerkiksi hyvää ilmaääneneristävyyttä tai runkoäänen vaimennusta vaativissa sovelluksissa on vielä tutkittu melko vähän. VTT:n asiakkaat ovatkin osoittaneet kiinnostusta aiheeseen ja vuonna 2020 tehtiin omarahoitteinen projekti aihepiirin kartoittamiseksi. Kirjoittaja on jatkojalostanut tuolloin kerättyä materiaalia tähän artikkeliin. Artikkelin pyrkii vastaamaan kysymykseen: miten nykyisten puukuitupohjaisten biokomposiittien vibroakustiset ominaisuudet vertautuvat saman käyttökategorian materiaaleihin, kuten alumiiniin, vaneriin, MDF-materiaaliin, lasikuituun tai muoveihin, kuten PP tai ABS? Jatkokysymys kuuluu: voidaanko ensimmäiseen kysymykseen antaa jokin yksinkertainen ja -käsitteinen vastaus?



© 2021 Jukka Tanttari. 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.

## 2 KATSAUS TUTKIMUKSEEN

Biokomposiittien tai biokomposiittirakenteiden vibroakustiikkaa koskevia tutkimuksia löytyy vähänlaisesti. Ne voidaan jakaa kahteen pääryhmään:

- Pienten näytteiden absorptio- ja ääneneristävyyssominaisuuksien kokeellinen tutkimus impedanssiputkimittauksin
- Materiaaliparametreja ja isompia rakenteita koskeva tutkimus

Tutkimukset [2, 3, 4, 5] kuuluvat pääosin ensimmäiseen ryhmään. Niiden informaatioarvo on melko vähäinen. Rakenteelliset biokomposiitit eivät ole huokoisia, eivätkä ne siten absorboi ääntä kovinkaan hyvin. Pienen, kiekkomaisen näytteen ääneneristävyyssmittaus putkessa taas antaa lähinnä näytteen jäykän kappaleen liikkeen massalain mukaisen tai sen ensimmäisen elastisen muodon massa- ja jäykkyysalueen mukaisen eristävyuden.

Jälkimmäisen ryhmän tutkimuksia löytyi muutamia, [3, 5, 6, 7]. Niissäkin materiaalin karakterisointi jää esimerkiksi häviöiden (viskoelastisuuden) tai ortotrooppisuuden osalta puutteelliseksi. Lisätutkimuksille on selvää tarvetta.

Jälkimmäisestä ryhmästä mielenkiintoisin ja ansiokkain on Viala et al [7] artikkeli viulun kaikukopan kannen 1:2 pienoismallin vibroakustiikasta. Kannessa (koekappaleita oli kaksi hieman erilaista) oli pellavakuitua epoksimatriisissa tilavuusosuudella 0.58...0.64. Kokeelliseen osaan kuuluivat kosketukseton heräte kaiuttimella ja kosketukseton värähtelymittaus laservibrometrillä. Laskentamallin (FEM) materiaaliparametreja päivitettiin käänteisprosessina useassa vaiheessa koetulosten perusteella. Kuitujen kimmomoduuli oli 60 GPa ja matriisiin 3.5 GPa. Laskennallinen analyysi antoi koko rakenteen kimmomoduuliksi 34.9...38.3 GPa suunnassa #1 ja 3.67...4.2 GPa suunnassa #2. DMA-mittausten mukaan häviöluku oli noin 0.023 suunnassa #1 ja 0.024 suunnassa #2. Materiaaliparametrit olivat huoneen lämpötilassa taajuudesta riippumattomat (ts. oltiin materiaalin lasialueella).

## 3 BOKOMPOSIITIN MIKROMEKANIIKASTA

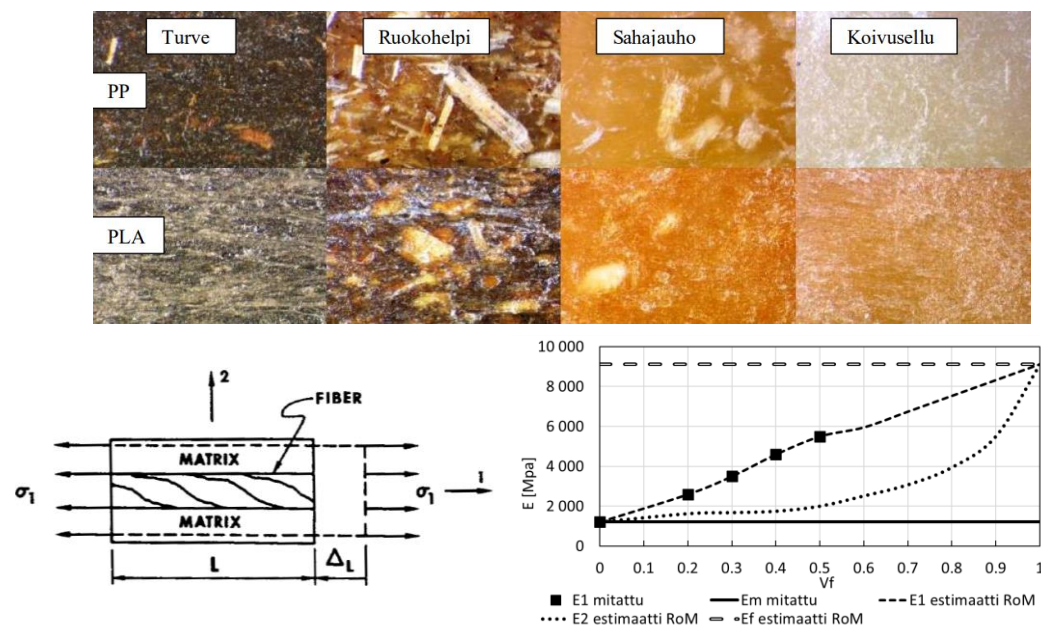
Partikkelien tai kuitujen tehtävä on lujittaa materiaalia ja kasvattaa sen jäykkyyttä. ”Kuidun” pituus on vähintään 100  $\mu\text{m}$  ja pituus/leveys -suhde suurempi kuin 10. Havupuukuitujen pituus on yleensä 3-8 mm ja halkaisija tyypillisesti 15-45  $\mu\text{m}$  [8]. Kuvassa 1 on biokomposiitteja, joissa kuituina on kotimaisia luonnontuotteita [9].

Kuitujen pituus ja jakautuma vaikuttavat siihen, miten komposiitin lujuus ja jäykkyys riippuvat suunnasta. Ns. sekoitussäännön (Rule of Mixtures, RoM; [10]) avulla saadaan jäykkyyden ylä- ja alalikiarvot komposiitille, jossa on jatkuvia, pitkiä, yhdensuuntaisia kuituja. Komposiitin venymä kuitujen suunnassa #1 oletetaan samaksi kuin kuitujen venymä. Siten kuituihin ja matriisiin syntyy erisuuret jännitykset. Suunnassa #2 venyy joustava matriisimateriaali ja kuituihin ja matriisiin syntyy sama jännitys. Tätä rinnakkaisten sekä sarjassa olevien jousten ideaa on havainnollistettu kuvassa 1 (alh. vas.). ”Teholliset” kimmomoduulit  $E_1$  ja  $E_2$  suunnissa #1 ja #2 ovat likimäärin [10]

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (1 \ \& \ 2)$$

missä  $E_f$  on kuitujen kimmomoduuli,  $E_m$  on matriisin kimmomoduuli ja  $V_f$  on kuitujen tilavuusosuus (= 0, kuin kuituja ei ole; = 1, kuin kaikki materiaali on kuitua).  $V_m$  on matriisin tilavuusosuus,  $V_f + V_m = 1$ ;  $V_m = 1 - V_f$ . Kuvassa 1 (alh. oik.) on sekoitussäännön perustella lasketut arviot kaupallisen biokomposiitin eräille parametreille. Jäykän suunnan

kimmomoduuli  $E_l$  tilavuusosuuksilla 0, 0,2, 0,3, 0,4 ja 0,5 sekä matriisimateriaalin kimmomoduuli  $E_m$  tunnetaan. Kuitujen kimmomoduuliksi saadaan noin 9100 MPa. Huom. tässä kuidut oletetaan RoM mukaisesti pitkiä ja yhdensuuntaisiksi.



**Kuva 1. Rakenteellisia biokomposiitteja, matriisina PP tai PLA, ylh. [9], sekoitussäännön idea pitkäkuituiselle komposiitille, alh. vasemmalla [10] sekä sekoitussäännön mukaisia materiaali-parametreja kaupalliselle biokomposiitille UPM Formi SP50 [11], alh. oikealla.**

Biokomposiittien matriiseissa käytettävät polymeerit ovat viskoelastisia; niillä on sekä elastisia että viskoosisia ominaisuuksia. Alhaisissa lämpötiloissa, kuten myös ”suurilla” taajuuksilla, ao. materiaalit ovat kovia ja jäykkiä, lasimaisia. Korkeissa lämpötiloissa ne ovat pehmeitä, kumimaisia. Muutos tapahtuu lasittumislämpötilassa  $T_g$ . Lasittumislämpötilan alueella jäykkyys (”varastomoduuli”) laskee nopeasti lämpötilan kasvaessa ja häviökerroin saa maksimiarvonsa. Linearisesti viskoelastisen materiaalin käyttäytyminen dynaamisessa muodonmuutoksessa ei riipu amplitudista. Tällöin materiaaliin liittyviä vibroakustisia laskelmia voidaan tehdä taajuustasossa. Sen sijaan voiman ja muodonmuutoksen suhde riippuu taajuudesta (kuormituksen vaihtelunopeudesta), jolloin materiaaliparametrit on tunnettava taajuuden (ja lämpötilan, johon taajuus on ”käänteisesti” sidottu) funktiona. Trevison et al [12] mukaan viskoosisuus liittyy ennen kaikkea matriisimateriaaliin. Kuitujen tilavuusosuuden kasvattaminen yleensä pienentää häviölukua. Jos häviölukua halutaan maksimoida, keinona voivat olla kuitujen pinoamisen järjestäminen leikkausmuodonmuutosta korostavaksi - kerrosrakenteen tyyppisesti.

#### 4 VIBROAKUSTISTA PROFILOINTIA

Materiaaliparametrien tunteminen on välttämätön, mutta ei riittävä ehto rakenteen vibroakustiikan hallinnalle: pienen jännityselementin muodonmuutokset eivät anna tarvittavaa informaatiota. Vibroakustiikassa tarkastellaan mekaanisia aaltoja, mittakeppinä Helmholtzin luku. Lisäksi tarvitaan viitekehys: millainen rakenne on kyseessä? Entä mitkä ovat heräte- ja vastesuureet? Tärkeitä rakenteen makroskooppisia ominaisuuksia ovat muun muassa rakenteen syöttöimpedanssi (tai mobiliteetti) erityyppisille heräteille, muoto ja sen vaikutus aaltotyyppisiin ja aaltolukuihin (esim. tasolaatta vs. kaareva rakenne, kuori vs. laatta, ohut vs. paksu), säteilytehokkuus (säteilysuhte, -impedanssi) sekä ilmaääneneristyvyys. Oman lisänsä antavat ympäröivän fluidin (yleensä ilma tai vesi) ominaisuudet.

Yllä mainitut asiat ovat monin osin toisistaan riippuvia. Rakenteen syöttöimpedanssi säätelee voimien ja niiden aiheuttamien siirtymien suhdetta ja siten rakenteeseen (mekaanisiin aaltoihin) syötettävän tehon määrää. Syöttöteho riippuu materiaaliparametreista ja rakenteen geometriasta. Rakenteessa etenevien aaltojen ominaisuudet suhteessa fluidissa etenevien aaltojen ominaisuuksiin vaikuttavat äänen säteilyyn ja ääneneristävyyteen.

Materiaalin ja siitä tehdyn - mutta vielä tarkemmin yksilöimättömän - rakenteen vibroakustista luonnetta voidaan karkeasti arvioida ”profiloinnin” avulla. Profilointi voidaan tehdä monella tavalla, esimerkiksi materiaaliparametrien ja levyrakenteen oletettujen mittojen, koon ja muodon perusteella. Tästä seuraavassa pari esimerkkiä.

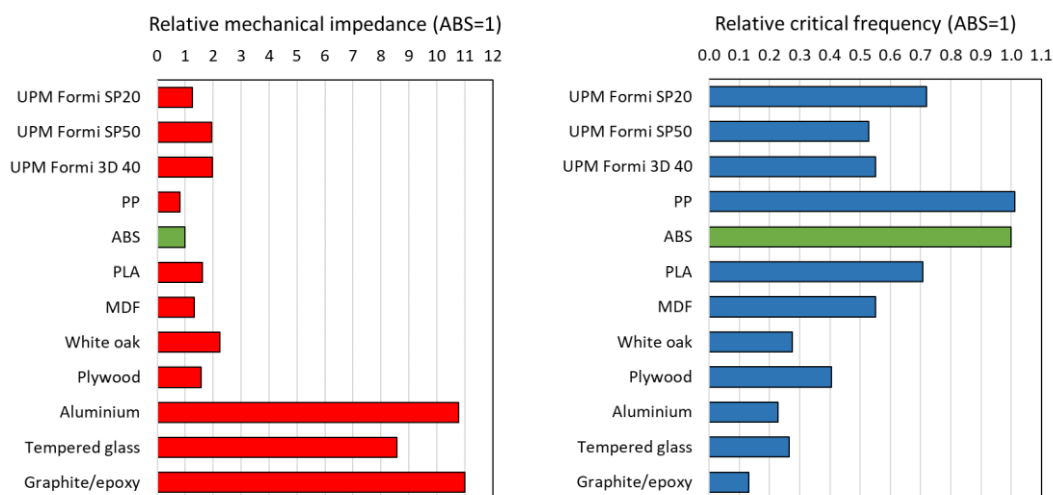
Ohuen (Kirchhoff) suurikokoisen laatan mekaaninen normaalin suuntainen impedanssi  $Z_{F,F}$  poikittaisaalloille (ts. taivutusaalloille) on [13, 14]

$$Z_{F,F} \approx 8\sqrt{D\rho h} = 8\sqrt{Dm'} \approx 2.3\sqrt{E\rho} h^2 \quad (3)$$

Kriittinen taajuus (koinssidensitaajuus)  $f_c$  ohuen laatan taivutusaalloille on [13, 14]

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho h}{D}} = \frac{c_0^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\rho}{E}} \quad (4)$$

missä  $c_0$  on ilmassa etenemisnopeus,  $\rho$  on rakennemateriaalin tiheys,  $E$  kimmomoduuli ja  $h$  rakenteen paksuus.  $D$  on taivutusjäykkyys. Kuvassa 2 on yhtälöiden 3 ja 4 mukaan lasketut suhteelliset profiilit eräille levymäisille materiaaleille/rakenteille. Paksuus  $h$  on vakioitu ja suuret normalisoitu ABS-muoviin (arvo = 1). Käytetyt materiaaliparametrit ovat kirjallisuudessa tyypillisesti esiintyviä tai valmistajan [11] ilmoittamia. Komposiiteilla on käytetty kimmomoduulin maksimiarvoja

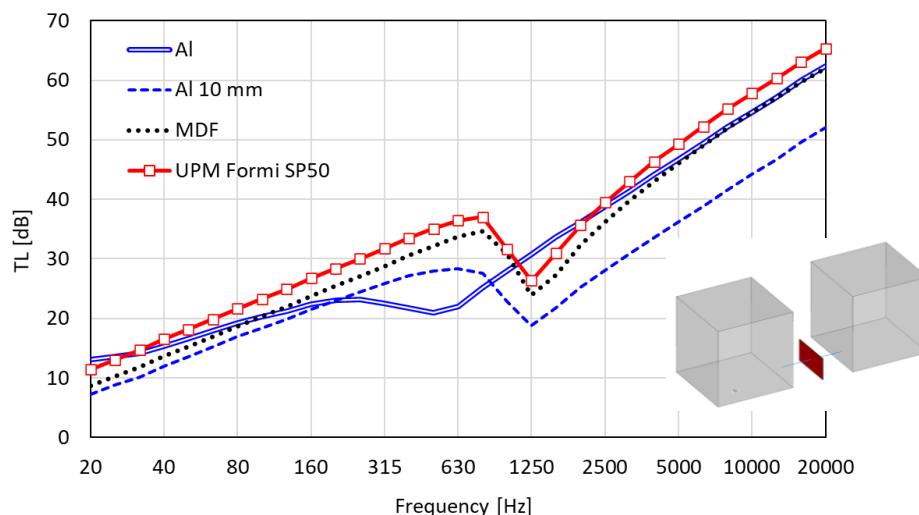


**Kuva 2: Materiaalien vibroakustisia profiileja normalisoituna ABS-muoviin. Vasen: taivutusaallon suhteellinen mekaaninen impedanssi. Oikealla; suhteellinen kriittinen taajuus.**

Kaupallisten biokomposiittirakenteiden impedanssi on parhaimmillaan noin kaksinkertainen vertailumateriaaliin ABS nähden. Kriittinen taajuus on selvästi alempana. Alumiinilla ja hiilikuitukomposiitilla impedanssi on suuri, kun taas kriittinen taajuus on suuren ominaisjäykkyyden myötä pieni. Kaupalliset biokomposiitit ovat profiloinnin nojalla vibroakustisesti melko lähellä MDF:ää. Tuloksista voidaan järjeillä, millaisia rakenteita mistäkin materiaalista on vibroakustisesta näkökulmasta edullista tehdä. Alumiinista ei yleensä kannata tehdä suurikokoista väliseinää, mutta pienikokoisessa, mahdollisesti kaarevassa rakenteessa se voi olla akustisesti kilpailukykyinen.

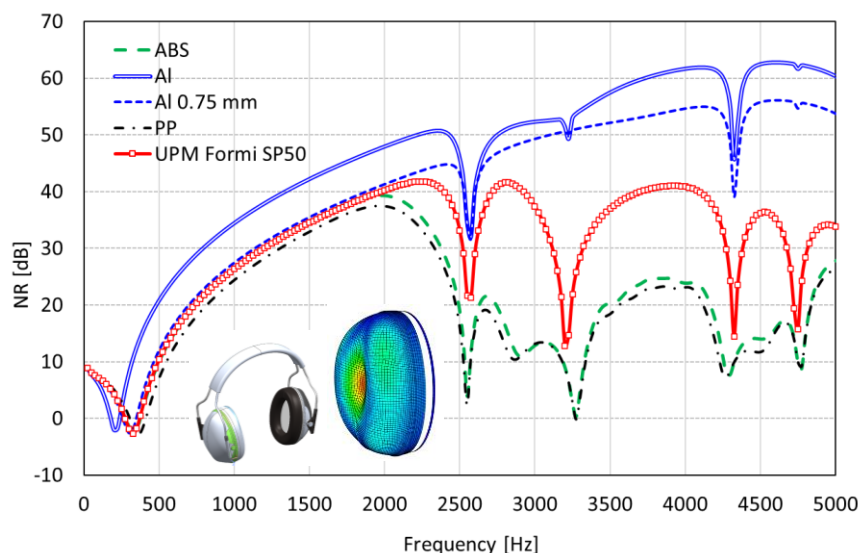
## 5 ESIMERKKEJÄ

Ensimmäinen esimerkki on seinärakenteen (ohut iso tasolaatta) ilmaääneneristävyyden eristävyys. Rakenteen paksuus on 25 mm tai 10 mm, materiaaleina Al, MDF ja UPM Formi SP50. Häviöluku on 0.05 tai 0.003 (Al). Häviöiden kontrolloima (resonoiva) äänenläpäisy 25 mm alumiinilla alkaa 500 Hz taajuudelta ja muilla rakenteilla 1250 Hz taajuudelta. UPM Formi on hieman parempi kuin MDF. Pienihäviöinen, resonoivasti ääntä läpäisevä alumiini ei ole kovin kilpailukykyinen.



**Kuva 3:** Ilmaääneneristävyyden eristävyys, seinä 1400 x 2800 x 25/10 mm. SEA-malli.

Toinen esimerkki koskee äänenpainetasoa (NR) yli kuulonsuojaimen kuvun. Huom: kiinnostuksen kohde on pienen, jäykän tyyppirakenteen käyttäytyminen, ei valmiin suojaimen absoluuttinen suojauskyky. Materiaalin paksuus on 1.6 mm, alumiinilla myös 0.75 mm. Häviöluku on 0.05 tai 0.003 (Al). Kupusuojaimen alin jousi/massa -muoto esiintyy yleensä 200...350 Hz alueella [15]. Ylempänä esiintyy sekä jäykän kappaleen muotoja että, materiaalin mukaan, kuorirakenteen elastisia muotoja. Alumiini on varsin kilpailukykyinen, kuten myös jäykkä biokomposiitti verrattuna muoveihin ABS ja PP.



**Kuva 4:** NR, kuulonsuojaimen kupu, 90 x 68 x 33 mm.  $s = 1.6$  mm tai 0.75 mm. FEM-malli.

## 6 KIITOKSET

Kiitän aineiston keräämismahdollisuudesta v. 2020 toteutettua VTT:n projektia 125707-GG\_Biosound sekä kollegoita lukuisista projektin aikaisista keskusteluista.

## VIITTEET

- [1] Jawaid, M., Salit, M. S., & Alothman, O. Y. (Eds.). Green Energy and Technology Green Biocomposites Design and Applications. 2017. 345p.  
<http://www.springer.com/series/8059>
- [2] Allan, P. S., Ahmadnia, A., Withnall, R., & Silver, J. Sound transmission testing of polymer compounds. *Polymer Testing* 31 (2012), 312-321.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.12.007>
- [3] Genc, G., & Koruk, H. Investigation of the vibro-acoustic behaviors of luffa biocomposites and assessment of their use for practical applications. *ICSV23 Proceedings*, 2016. <https://www.researchgate.net/publication/305393667>
- [4] Glé, P., Gourdon, E., Arnaud, L., Horoshenkov, K.-V., & Khan, A. The effect of particle shape and size distribution on the acoustical properties of mixtures of hemp particles. *The Journal of the Acoustical Society of America* 134 (2013), 4698–4709.  
<https://doi.org/10.1121/1.4824931>
- [5] Huang, K., Tran, L. Q. N., Kureemun, U., Teo, W. S., & Lee, H. P. Vibroacoustic behavior and noise control of flax fiber-reinforced polypropylene composites. *Journal of Natural Fibers* 16 (2019), 729–743. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1433096>
- [6] Santoni, A., Bonfiglio, P., Mollica, F., Fausti, P., Pompoli, F., & Mazzanti, V. Vibro-acoustic optimisation of Wood Plastic Composite systems. *Construction and Building Materials* 174 (2018), 730-740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.155>
- [7] Viala, R., Placet, V., & Cogan, S. Identification of the anisotropic elastic and damping properties of complex shape composite parts using an inverse method based on finite element model updating and 3D velocity fields measurements (FEMU-3DVF): Application to bio-based composite violin soundboards. *Composites Part A* 106 (2018), 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.018>
- [8] Yli-rantala, L. Biohajoavasta muovista ja luonnonkuidusta valmistettu komposiitti (p. 88). TTY Diplomityö. 2014. 88 s.
- [9] Immonen, K., Vikman, M., Saarinen, A., Ylä-Sulkava, T., Itävaara M. & Ryyänen T. Turvekomposiitti. VTT-R-06631-10. 2010. 37 s.
- [10] Jones, R. M., *Mechanics of Composite Materials* (Second Ed.). Taylor&Francis, 1999. 519 p.
- [11] UPM., Technical Specification. UPM Formi SP (p. 1). 2017.
- [12] Treviso, A., Van Genechten, B., Mundo, D., & Tournour, M. Damping in composite materials: Properties and models. *Composites Part B* 78 (2015), 144–152.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.081>
- [13] Cremer, L., Heckl, M., & Petersson, B. A. T. *Structure-borne sound: Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*. Springer Verlag, 2005. 607 p.
- [14] Fahy, F., & Gardonio, P. *Sound and Structural Vibration. Radiation, Transmission and Response* (2nd ed.). Academic Press, 2007. 633 p.
- [15] Boyer, S., Doutres, O., Sgard, F., Laville, F., & Boutin, J. Low frequency finite element models of the acoustical behavior of earmuffs. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137 (2015), 2602–2613. <https://doi.org/10.1121/1.4919326>