

VAIMENNUSMATERIAALIN SIJOITUKSEN VAIKUTUS HUONEAKUSTIIKKAAN

Jose Cucharero ^{1,2*}, Tuomas Hänninen ^{1,3} ja Tapio Lokki ²

¹ Lumir Oy, Tammiston kauppatie 22, 01510 Vantaa

² Aalto-yliopisto, Tietotekniikan laitos, PL 13100, 00076 Aalto

³ Aalto-yliopisto, Biotuotteiden ja biotekniikan laitos, PL 16300, 00076 Aalto
jose.cuchareromoya@aalto.fi

Tiivistelmä

Luokkahuoneissa ja monitilatoimistoissa jälkikaiuntaa vaimennetaan asentamalla ääntä absorboivia akustiikkalevyjä kattoon ja seinille. Näin saadaan äänitasoa laskettua, parannettua puheen ymmärrettävyyttä sekä tehtyä tiloista miellyttävämpiä. Tässä työssä tutkittiin akustiikkalevyjen sijoittelun vaikutusta huoneen vaimentamiseen, toisin sanoen miten akustiikkalevyt pitäisi asentaa, jotta saavutettaisiin mahdollisimman hyvä äänenvaimennus. Mittauksia tehtiin sekä kaiuntahuoneessa että luokkahuonetta muistuttavassa ympäristössä. Tulokset osoittavat, että akustiikkalevyt vaimentavat vähemmän ääntä, jos ne asennetaan huoneen nurkkiin, jos huoneen äänikenttä on diffuusi. Jos huoneessa on selkeästi pintoja, joiden välille ääni jää heijastelemaan, silloin luonnollisesti paras absorptiomateriaalin sijoituspaikka on vaimentaa kyseiset pinnat.

1 JOHDANTO

Luokkahuoneiden akustiikalla on suuri vaikutus oppimiseen ja opettajien hyvinvointiin. Hälyisä akustiikka voi johtaa oppimisvaikeuksiin ja heikompaan sosiaaliseen kanssakäymiseen [1, 2, 3]. Tutkimukset osoittavat, että erityisesti nuorten lapsien oppimistulokset kärsivät korkeista melutasoista sekä kaikuisista tiloista [2]. Erityisesti kielten opetusluokkien akustiikkaan tulisi kiinnittää huomiota. Eniten hälyisistä luokista kärsivät huonokuuloiset sekä puheongelmaiset oppilaat. Luokkien akustiikan parantamisella on myös positiivinen vaikutus opettajien hyvinvointiin [4].

Akustikkalevyjen optimaalinen sijoittaminen tuottaa parhaan mahdollisen ääniympäristön sekä säästää kustannuksia. Tässä tutkimuksessa ääntä absorboivan materiaalin sijoittelun vaikutusta tutkittiin mittaamalla kahden vaimennusmateriaalin absorptioker-
toimet jälkikaiuntahuoneessa sekä huoneessa, joka kalustettiin muistuttamaan luokkahuonetta. Jälkimmäisessä huoneessa mitattiin jälkikaiunta-aika (T_{20}), selkeys (C_{50}) and puheensiirtaindeksi (STI) sijoittamalla tietty määrä vaimennusmateriaalia useammalla

Copyright ©2019 Jose Cucharero, Tuomas Hänninen ja Tapio Lokki. 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.

eri tavalla. Tutkimuksen tarkoitus oli tarkastella materiaalisijoittelun vaikutusta näihin yleisesti mitattuun huoneakustiikan tunnuslukuihin.

2 MENETELMÄT

2.1 Kaiuntahuonemittaukset

Kahden vaimenusmateriaalin absorptiokertoimet määritettiin ISO-354 standardin [5] mukaisella mittauksella Aalto-yliopiston kaiuntahuoneessa. Huoneen mitat ovat 8.7 m x 6.2 m x 3.6 m, eli tilavuus on 194 m³. Huoneessa roikkui 8 diffusoria estämässä häiritseviä tärykaikuja ja huoneen Schröder-taajuus on 275 Hz. Mittaukset tehtiin ilmaisella ARTA-ohjelmalla (<http://www.artalabs.hr>), joka tekee impulssivastemittaukset logaritmisellä sinipyyhkäisyllä. Kussakin mittaustilanteessa tehtiin standardin mukaisesti 12 jälkikaiunta-aikamittausta, kahdesta lähdepisteestä kuuteen mikrofonipisteeseen. Mikrofonit olivat pallokuvioisia mittaussmikrofoneja ja äänilähteenä käytettiin Genelec 8040 -kaiutinta, joka suunnattiin diffusoreita kohti. Huoneen lämpötilaa ja ilmankosteutta seurattiin mittausten ajan ja ne eivät muuttuneet mittausten aikana.

Tutkitut materiaalit olivat Lumir Oy:n valmistamia 8 mm paksuja puukuidusta ruiskutettuja levyjä sekä 100 mm paksuja Rockwool Finland Oy:n valmistamia kivivillalevyjä. Molempia materiaaleja oli käytettävissä 12 m². ISO-354 standardi ohjeistaa sijoittamaan mitattavan näytteen huoneen keskelle. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon määritetty absorptiokerroin muuttuu, jos materiaalit sijoitetaan lähemmäksi seiniä tai jopa huoneen nurkkaan (kuva 1).

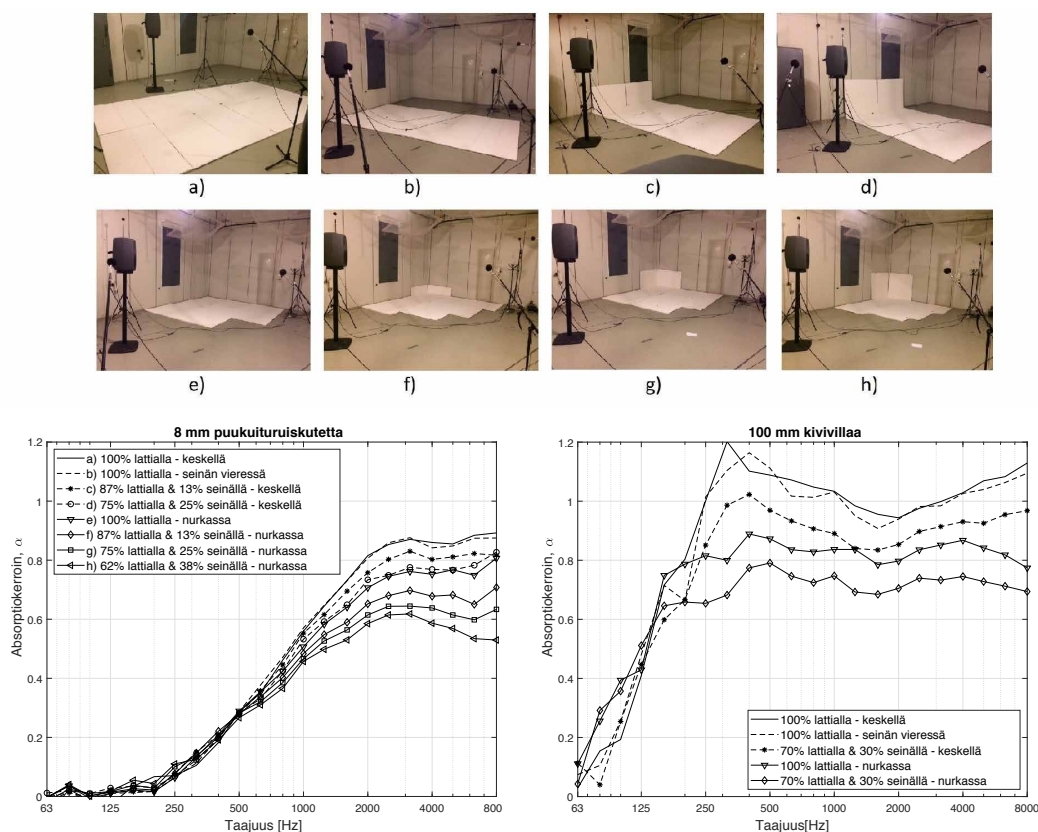
2.2 Luokkahuonetta jäljittelevä mittaustila

Vaimennusmateriaalien sijoittelun vaikutusta huoneen akustiikkaan tutkittiin myös toisessa mittaustilassa, joka kalustettiin pöydillä ja tuoleilla muistuttamaan luokkahuonetta. Tämän huoneen tilavuus oli 125 m³ ja pöytiä sekä tuoleja oli molempia 13. Luokkahuoneen mittaukset suoritettiin tyhjässä huoneessa.

Mittaukset tehtiin standardeiden ISO 3382-1:2009 [6] ja IEC 60268-16:2011 [7] mukaan ja kuten aiemmin todettiin mittauksista laskettiin T_{20} , C_{50} ja STI. Tällä kertaa käytettiin neljää vastaanottopistettä ja kahta lähdepistettä. Äänilähteenä oli Genelec 8030B -kaiutin, jonka suuntaavuus muistuttaa ihmisen pään suuntaavuutta. Puheensiirtoindeksin arvot laskettiin ilman signaalikohinasuhteen vaikutusta, eli ainoastaan jälkikaiunta muutti STI:n arvoja.

Tässä "luokkahuoneessa" vaimennusmateriaalina oli 10.6 m² 50 mm paksua Ecophon Oy:n valmistamaa lasivillaa. Tutkitut materiaalisijoittelut olivat (kts. kuvat 2a-d):

- (a) 100% sivu- ja päätyseinällä katonrajassa.
- (b) 50% seinällä katonrajassa 50 % katossa huoneen perällä.
- (c) 100% katossa huoneen perällä.
- (d) 100% katon keskellä.



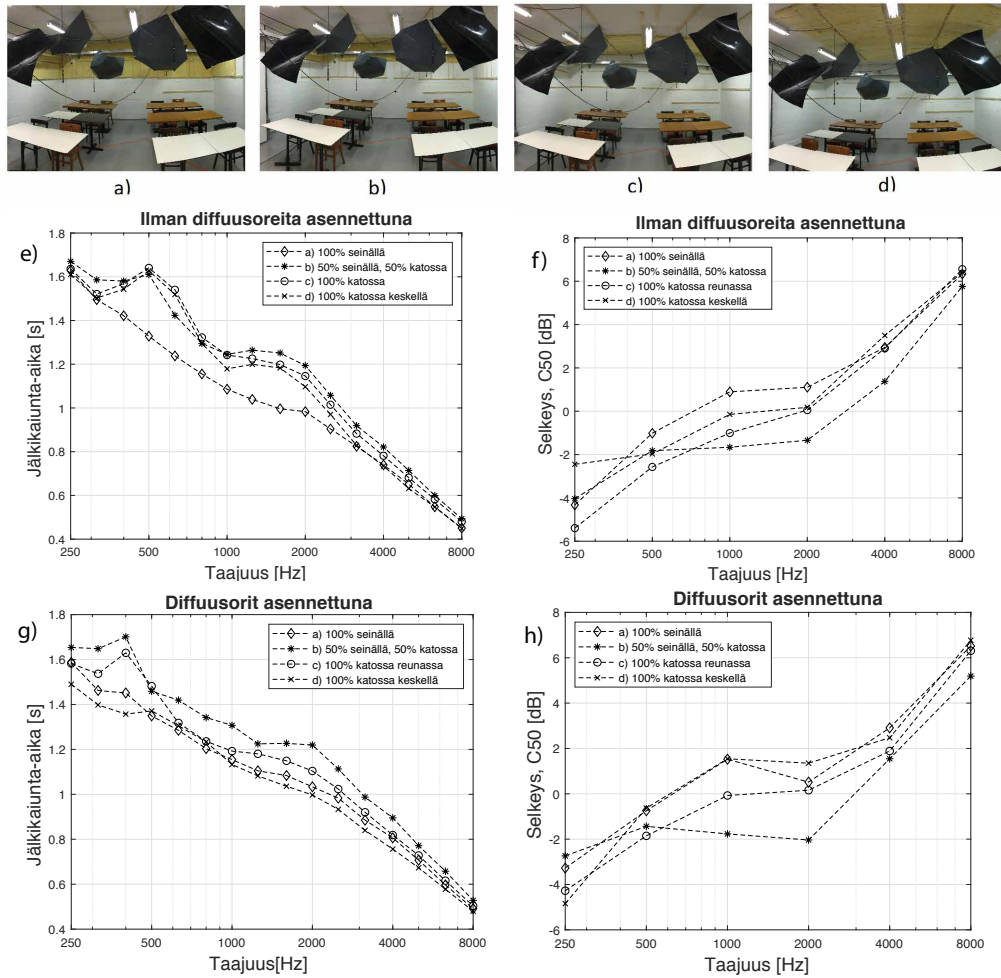
Kuva 1: Absorptiokertoimet: 8 mm ruiskutettua puukuitua (vasemmalla) ja 100 mm kivivillaa (oikealla) materiaalien ollessa a) huoneen keskellä, b) lähellä seinää, c-d) osoitain seinällä sekä e-h) huoneen nurkassa erilaisilla sijoitteluilla. Kuvissa on ruiskutetut puukuitulevyt.

Luokkahuoneemme mitattiin tyhjänä, jolloin pelkät tuolit ja pöydät eivät riitä tekemään äänikentästä kovin diffuusia. Niinpä mittaukset toistettiin asentamalla 6 noin neliön kokoista diffusoria huoneeseen (kts. Kuvat 2a-d).

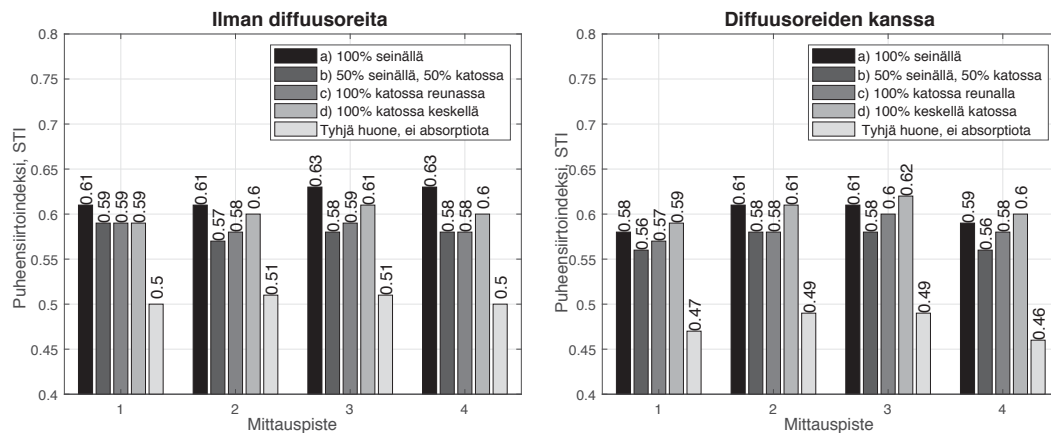
3 TULOKSET

3.1 Absorptiokerroinmittaukset kaiuntahuoneessa

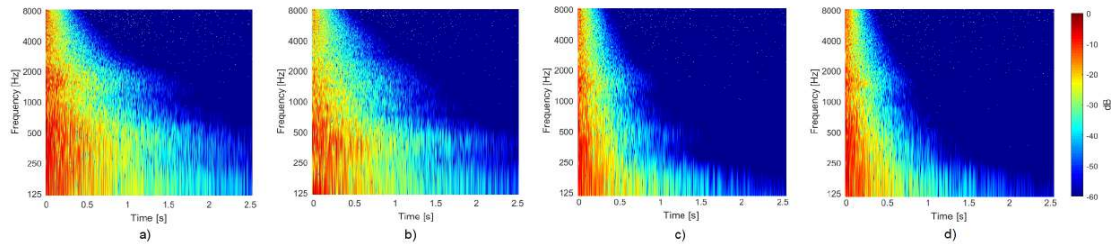
Kuva 1 esittää mitatut absorptiokertoimet terssikaistoittain usealla materiaalien sijoitteluilla. Kuvaajista nähdään selvästi, että absorptiokertoimien arvot putoavat sitä enemmän mitä enemmän vaimennusmateriaalia sijoitetaan lähemmäksi huoneen nurkkaa. Ero on merkittävä ja se on suurimmillaan yli 20% keski- ja nurkkasijoituksien välillä.



Kuva 2: Luokkahuoneessa mitatut T_{20} ja C_{50} , vaimennusmateriaalina oli 50 mm lasivillaa asennettuna a) katon rajaan seinälle, b) puolet seinälle ja puolet kattoon, c) kattoon seinän vierustalle ja d) katon keskelle. Kuvissa e-f) on mittaustulokset ilman roikkuvia diffusoreita ja g-h) diffusoreiden kanssa.



Kuva 3: Luokkahuoneessa mitatut puheensiirtindeksin arvot neljässä eri mittauspisteessä erilaisilla vaimennusmateriaalin sijoitteluilla sekä diffusoreiden kanssa että ilman.



Kuva 4: Luokkahuoneessa mitatuista impulssivasteista lasketut spektrogrammit: a) huone ilman vaimennusmateriaaleja ja diffusoreita, b) huone ilman vaimennusmateriaaleja, mutta diffusorit asennettuna, c) vaimennusmateriaalit keskellä kattoa, mutta ei diffusoreita ja d) vaimennusmateriaalit peräseinällä ilman diffusoreita.

3.2 Luokkahuonemittaukset, jälkikaiunta-aika T_{20} , puheen selkeys C_{50} ja puheensiirtoindeksi STI

Kuvassa 2 on T_{20} ja C_{50} mittaustulokset neljälle eri materiaalijoittelulle sekä diffusorien kanssa että ilman niitä. Mitatut puheensiirtoindeksin arvot on esitetty kuvassa 3. Ensimmäiset mittaukset tehtiin ilman diffusoreita ja jälkikaiunta-ajoista näkee (kuva 2e)) kuinka vain seinälle asennettu vaimennusmateriaali pienentää jälkikaiuntaaikaa alle 3 kHz taajuuksilla. On ilmiselvää, että ääni jää heijastelemaan seinien välillä ja siksi katossa oleva vaimennusmateriaali ei vaikuta juurikaan jälkikaiunta-aikaan [8]. Lisäksi mittausten aikana havaittiin selvä tärykaiku 1-2 kHz taajuuksilla. Tämä taajuusalue vaimeni selvästi hitaammin, kuten kuvan 4a spektrogrammi paljastaa. Kuva 4d osoittaa, että seinälle asennettu lasivilla vaimentaa tehokkaasti nämä seinien välille muodostuvat moodit noin 500 Hz taajuudella sekä tärykaiut 1-2 kHz taajuusalueella. Nämä tulokset osoittavat selvästi, että jos tilassa on selkeitä moodeja tai tärykaikuja niin silloin ilman muuta tehokkain vaimennusmateriaalin paikka on sellainen, joka vaimentaa nämä ilmiöt.

Kun luokkahuoneeseen asennettiin roikkuvat diffusorit (kuvissa 2a-d), lyhin jälkikaiunta-aika ja paras puheen selkeys mitattiin tilanteessa, jossa vaimennusmateriaalit oli asennettuna katon keskelle, varsinkin niillä taajuusalueilla, joilla äänikenttä oli riittävän diffuusi (eli ilman vahvoja moodeja ja tärykaikuja). Kuva 4b osoittaa hyvin, kuin roikkuvat diffusorit poistivat häiritsevät tärykaiut, mutta suurempia diffusoreita tai muita huonekaluja olisi tarvittu, jotta äänikenttä olisi ollut tasaisempi myös alle 1000 Hz taajuuksilla.

4 YHTEENVETO

Kaiuntahuoneessa tehdyt kahden eri vaimennusmateriaalin absorptioeroinmittaukset osoittivat, että mitä lähemmäksi huoneen nurkkia vaimennusmateriaali sijoitetaan, sitä vähemmän se imee ääntä. Sijoituksen vaikutus oli hämmästyttävän suuri, jopa yli 20% huoneen keskelle ja huoneen nurkkaan sijoittelun välillä. Käytännössä huoneen nurkassa tarvitaan siis 20% enemmän vaimennusmateriaalia, joka on merkittävä kustannuslisäys.

Mittaukset toistettiin toisessa tilassa, joka kalustettiin pöydillä ja tuoleilla muistuttamaan luokkahuonetta. Koska tämän tilan betoniseinillä ei ollut mitään (esim. kirjahyllyjä) niin

näiden seinien välille ääni jäi heijastelemaan pitkäksi aikaa. Kun huoneeseen asennettiin roikkuvat heijastinlevyt niin äänikenttä diffusoitui enemmän ja materiaalisijoituksen vaikutus äänen vaimenemiseen pystyttiin toistamaan. Tämä lisätutkimus oli hyvä muistutus siitä, että vaimennusmateriaalin sijoituksessa tulee aina ensin pohtia, onko huoneessa mahdollisia pintoja, joiden välille ääni voi jäädä heijastelemaan ja tällaiset pinnat tulee luonnollisesti vaimentaa ensimmäisenä.

Tämän tutkimuksen tulokset ovat jokseenkin ristiriidassa standardissa SFS 5907 [9] esitettyjen suositusten kanssa. Standardissa suositellaan jättämään luokkahuoneen katon keskiosa vaimentamatta, jotta opettajan ääni kantautuisi hyvin myös luokkahuoneen perälle. Tämä on varmasti toimiva ratkaisu, mutta silloin vaimennusmateriaali joudutaan sijoittamaan katon nurkkiin ja osin seinille, jotka tämän tutkimuksen mukaan eivät ole optimaalisia vaimennustehon näkökulmasta. Ennenkuin lopullisia johtopäätöksiä voidaan esittää, tarvitaan lisää mittauksia oikeissa luokkahuoneissa erilaisilla materiaalisijoituksilla. Vasta niiden myötä voidaan varmistua, miten oppimista ja hyvinvointia tukeva ääniympäristö luokkahuoneisiin pitäisi toteuttaa mahdollisimman kustannustehokkaasti.

VIITTEET

- [1] D. Lubman and L.C. Sutherland. Classroom acoustics for the 21st century. In *19th International Congress on Acoustics*. International Commission on Acoustics (ICA), 2007.
- [2] J. Bradley and H. Sato. The intelligibility of speech in elementary school classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(4):2078–2086, 2008.
- [3] B. Shield, R. Conetta, J. Dockrell, D. Connolly, T. Cox, and C. Mydlarz. A survey of acoustic conditions and noise levels in secondary school classrooms in england. *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(1):177–188, 2015.
- [4] C. Campbell, C. Svensson, and E. Nilsson. Classroom acoustic research on speech behaviour of teachers and students. In *The 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise)*. International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE), Innsbruck, Austria, 2013.
- [5] ISO 354. Acoustics—measurement of sound absorption in a reverberation room. 2003.
- [6] ISO 3382-1. Acoustics – measurement of room acoustic parameters – part 1: Performance spaces. International Standards Organization, 2009.
- [7] IEC 60268-16. Sound system equipment – part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. International Electrotechnical Commission, 2011.
- [8] J. Angus. The effect of diffusers on frequency dependent room mode decay. In *107th Convention of the Audio Engineering Society*. Audio Engineering Society (AES), 1999.
- [9] SFS 5907. Rakennusten akustinen luokitus. Suomen standardoimisliitto, 2004.