

MONIKERROSMATERIAALIN SUURIMMAN ABSORPTIOSUHTEN HAKEMINEN

Esa Nousiainen ja Jukka Tanttari

VTT Tuotteet ja tuotanto
PL 1307 / Tekniikankatu 1, 33101 TAMPERE
etunimi.sukunimi@vtt.fi

1 JOHDANTO

Työkoneohjaamojen suunnittelussa joudutaan toimimaan ankarien tilarajoitusten paineessa. Ohjaamon ulkomitat määräytyvät mm. koneen kokonaismittojen ja painon perusteella. Ohjaamon vapaat sisämitat riippuvat kuljettajan työskentely- ja liikkumatilalle asetetuista vaatimuksesta. Akustisesti kovien ikkunapintojen pinta-alaosuus maksimoidaan hyvän näkyvyyden saamiseksi. Lasipinnat ja seinät ovat voimakkaasti muotoiltuja ja kaarevia. Erilaisten hallinta- ja mukavuuslaitteiden käyttöpaneelit ja itse laitteet vievät suuren osan jäljelle jäävästä alasta.

Työkoneen ohjaamoakustiikan onnistuneen suunnittelun kannalta on tärkeää saada käytettävissä olevaan pieneen tilaan mahdollisimman hyvin toimiva absorbentti, joka kestää tarvittaessa kulutusta ja on esteettisesti miellyttävä. Hyvin toimivalla absorptiomateriaalilla voidaan ohjaamon äänenpainetasoa pienentää kilpailukyvyyn kannalta ratkaiseva viimeinen desibeli. Toisaalta absorptiomateriaalilla voidaan vaikuttaa ohjaamon äänenlaatuun. Äänenlaadun kvantitatiivista arviointia työkoneissa kehitetään käytännön tasolla Äänenhallintaryhmän tutkimushankkeissa.

Tässä työssä haettiin suurimman absorptiosuhteen antavaa tyyppillistä työkoneohjaamossa käytettävää pinnoitettua absorptiomateriaaliyhdistelmää, kun käytettävissä on 50 mm paksu tila. Äänenhallintaryhmän aiemmissa töissä on saatu hyviä tuloksia reaktiivisen vaimenninjärjestelmän lisäsvaimennuksen optimoinnissa [1]. Tässä työssä sovellettiin samaa laskutapaa.

2 MALLINNUSTAPA

Monikerrosateriaalin huokoiset kerrokset mallinnetaan yksinkertaisen ja käyttökelpoisen Delanyn ja Bazleyn ekvivalentti fluidi-mallin avulla. Huokoista materiaalia kulutukselta suojaava pintakalvo mallinnetaan reaktiivisena massana ja taustalevy joko massamaisena komponenttina tai huomioiden sen taivutusjäykkyys. Levyn säteilyimpedanssi kirjoitetaan äärettömän levyn impedanssina tai levyn pinta-alasta ja muodosta riippuvana impedanssina.

2.1 Absorptiomateriaalin ja pintakalvon mallinnus

Huokoinen materiaali mallinnetaan ekvivalenttina fluidina. Tällöin jätetään huomioimatta materiaalin rakenteen elastisuudesta aiheutuva absorptio sekä elastisen materiaalin ja ohuen pintakalvon kytkentä värähtelymielessä. Huokoisen materiaalin ominaisimpedanssille Z_o ja etenemisvakiolle γ käytetään Delanyn ja Bazleyn esittämiä tunnettuja empiirisiä potenssilausekkeita [2].

Kiinteästi kovaa seinää (täysin heijastava, $(Z = \infty)$) vasten asennetun absorptiomateriaalilevyn pinnan normaali akustinen ominaisimpedanssi eli pintaimpedanssi voidaan laskea, kun tunne-

taan etenemisvakio γ , karakteristinen impedanssi Z_0 ja materiaalin paksuus l . Materiaalin pintaimpedanssille saadaan esitys

$$Z = Z_0 \coth(\gamma l) \quad (1)$$

Yleisessä muodossa kerrosrakenteen impedanssi voidaan kuvata rekursiivisesti [3], [4], missä Z_i ja Z_{i+1} ovat valitun materiaalikerroksen ominaisimpedanssi (alaindeksi spec) ja seinäimpedanssi (alaindeksi wall) kuvan 1 mukaan,

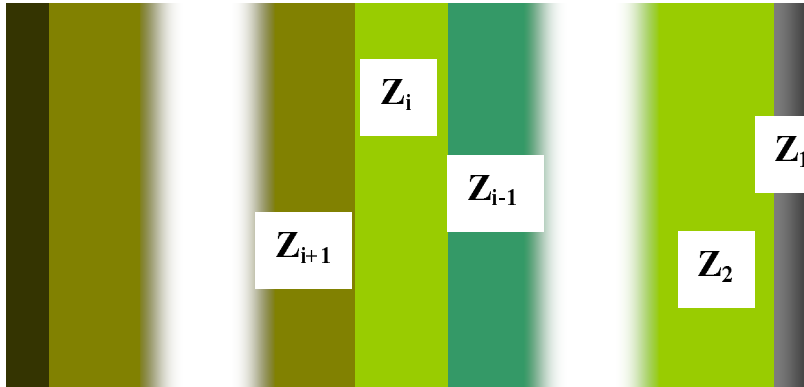
$$Z_{(i+1)wall} = Z_{(iwall)} \frac{Z_{(iwall)} + Z_{(i+1)spec} \coth(\gamma_{(i+1)} l_{(i+1)})}{Z_{(i+1)spec} + Z_{(iwall)} \coth(\gamma_{(i+1)} l_{(i+1)})} \quad (2)$$

ja ilmaväli kuvataan reaalisenä impedanssina $\rho_0 c_0$ (414 Rayls).

Pintakalvon vaikutus huomioidaan sen pinta-alamassan aiheuttama lisäyksenä kalvon takana olevan materiaali-ilmaväliyhdistelmän seinäimpedanssin imaginääriosaan [5]

$$Z_{kalvo} = j \cdot \omega \sigma_{kalvo} \quad (3)$$

missä j on imaginääriyksikkö, ω on kulmataajuus ja σ_{kalvo} on kalvon pinta-alamassa [kgm^{-2}]. Pinta-alamassa lasketaan kalvomateriaalin tiheyden ja paksuuden perusteella.



Kuva 1. Monikerroksisen rakenteen kuvaaminen impedanssarjakehitelmällä

Normaalin tulokulman absorptiosuhteelle saadaan pintaimpedanssin avulla esitys [2], [3], [4]:

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (4)$$

2.2 Taustalevyn mallinnustapoja

Kattorakenteen takana olevan ilmatilan vaikutusta kattolevyn “näkemään” impedanssiin voidaan arvioida kahdella tavalla: kuvataan ilmatila äärettömän (käytännössä aallonpituuteen nähden suuren) levyn näkemänä reaalisenä impedanssina ($\rho_0 c = 414$ Rayls). Toinen tapa on laskea

levyn mitoista riippuva säteilyimpedanssi. Levyn äänensäteily mallinnetaan tällöin jäykässä äärettömässä levyssä liikkuvan jäykän mäntärakenteen äänensäteilyinä.

Morse ja Ingard [6] esittävät neliskulmaisen levyn säteilyimpedanssin muodossa

$$Z_{rad} = \rho c ab [\theta_0(ka) - j \chi_0(ka)] \quad (5)$$

Nelikulmaisen levyn säteilyimpedanssia voidaan approksimoida kaavan (5) avulla, kun levyn mitat ovat samansuuruiset, $a \rightarrow b$. Hakasuluissa olevat funktiot θ ja χ ovat levyn säteilyresistanssi ja säteilyreaktanssi. Kuvassa 2 esitetään neliölevylle lasketut säteilyresistanssi ja säteilyreaktanssi.

Itse kattorakenteen impedanssi voidaan mallintaa reaktiivisena, pinta-alamassasta riippuvana impedanssina. Lasketaan kattorakenteen impedanssi kattolevyn pinta-alamassan σ_{levy} perusteella

$$Z_{levy} = j \cdot \omega \sigma_{levy} \quad (6)$$

Jos halutaan huomioida levyn jäykkyyden vaikutus, voidaan kuvata levyn impedanssi ohuen levyn impedanssina:

$$Z_{levy} = j \cdot \omega \sigma_{levy} - \frac{j}{\omega} D \kappa^4 \quad (7)$$

missä κ on aaltoluku levyssä ja D on levyn taivutusjäykkyys [5]. Kattorakenteen ja sen takana olevan ilmatilan impedanssia (tai levyn säteilyimpedanssia) pidetään (ilmaväli-)absorbentti-muovikalvo-yhdistelmän näkemänä impedanssina Z_1 .

$$Z_1 = Z_{rad} + Z_{levy} \quad (8)$$

Edellisessä luvussa kuvatulla rekursiolla lasketaan koko yhdistelmän seinäimpedanssi ja absorptiosuhde.

3 LASKENTAMENETELMÄ JA PARAMETRIEN ARVOT

Koska impedanssikehiteelmä lasketaan rekursiivisesti ja huokoisen materiaalin ominaisuudet kuvataan potenssikaavojen avulla, muodostuu ns. optimoitava kustannusfunktio liian monimutkaiseksi jonkin matemaattisesti sofistikoituneen optimointimenetelmän käyttöä ajatellen. Monikerros materiaalin absorptiosuhteen optimointiongelmaa ovat laajemmin käsitelleet ansiokkaasti esim. Backman et al. [7].

Muuttujien arvot ja parametrien muutoksen suuruus on tässä tapauksessa rajoitettu käytännön syistä varsin kompaktiksi joukoksi. Parasta absorptiokykyä voidaan hakea suoraan laskemalla materiaaliyhdistelmän absorptiosuhde kaikilla materiaaliyhdistelmillä. Implementoitiin edellisessä luvussa esitetyt menetelmät Matlab-ympäristössä.

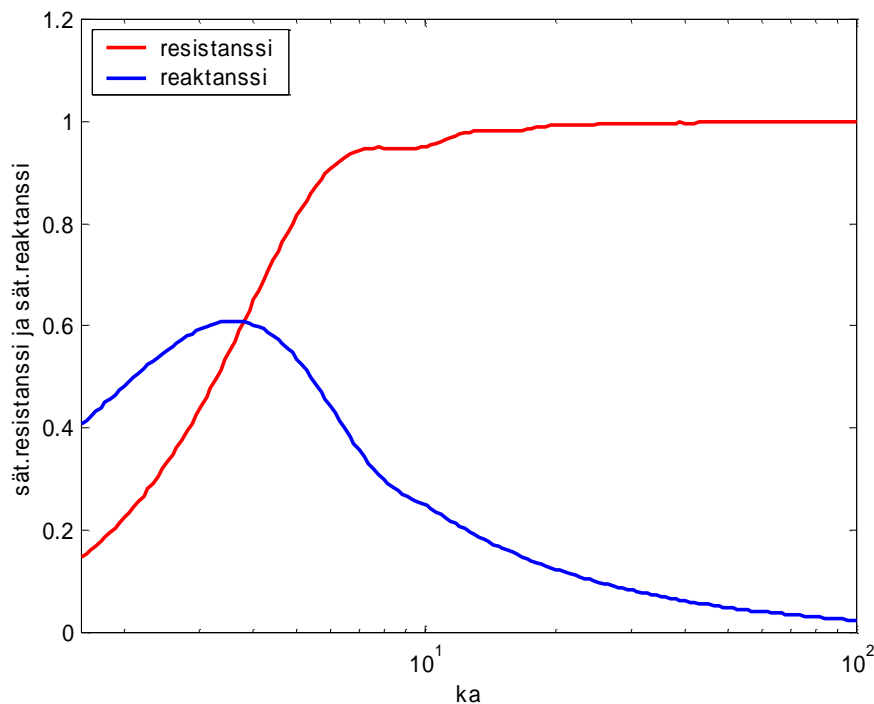
Vertailuluvuksi valitaan tässä absorptiosuhteen keskiarvo taajuuskaistalla 100 Hz ... 700 Hz. Maksimi voidaan hakea tallettamalla kullakin materiaaliyhdistelmällä saavutettava taajuuskaistan 100 Hz...700 Hz keskimääräinen absorptiosuhde yhteen vektoriin ja hakemalla vektorin

maksimikomponentti ja maksimin indeksi. Indeksien perusteella saadaan selville materiaaliyhdistelmä, millä maksimiarvo saavutettiin.

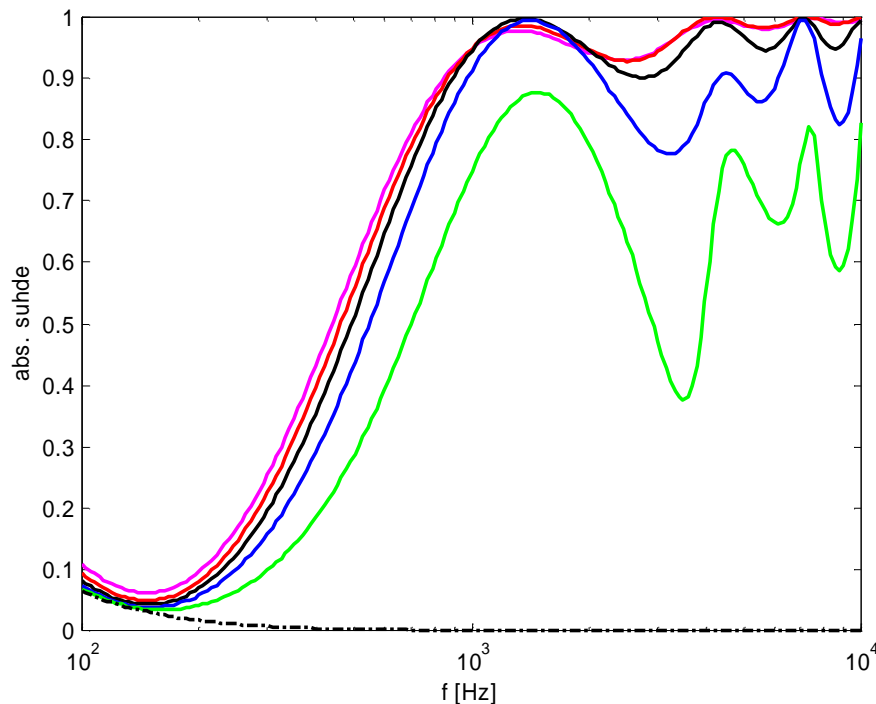
Taulukko 1. Materiaalin eri parametriyhdistelmät.

Muuttuja	Minimi	Maksimi	Muutos
Virtausvastus R_f [Nsm^4]	10000	50000	10000
Materiaalin paksuus L [m]	0,00	0,05	0,01
Ilmavälin paksuus l [m]	0,00	0,05	0,01
Kalvon paksuus d [m]	0	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Levyn pinta-alamassa σ_{levy} [kgm^{-2}]	5	5	0

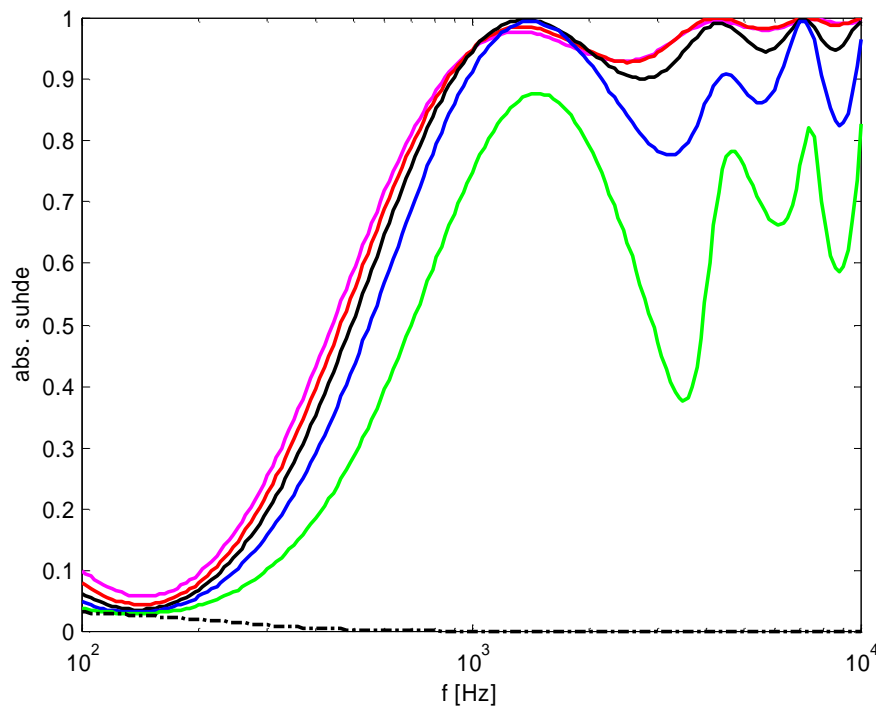
4 TULOKSET



Kuva 2. Nelikulmaisen levyn säteilyimpedanssin reaali- ja imaginääriosia. Vaaka-akselilla muuttujana on levyn mitat ja aallonpituuden suhteuttava muuttuja $(2\pi a)/\lambda$. Tässä molemmat sivut a ja b ovat yhtä pitkät, 1,2 m. Aallonpituus tarkastelualueella 3,4 m ... 0,034 m. Reaktanssille on käytetty yksinkertaista approksimaatiota, kun $ka > 10$.



Kuva 3. Absorptiosuhteen muuttuminen materiaaliparametrien arvojen muuttuessa. Kuvassa absorptiomateriaalin paksuus vaihtuu arvosta 10 mm arvoon 50 mm 10 mm askelin (taajuudella 500 Hz alhaalta ylös). Kalvon paksuus vaihtuu arvosta 5 μm arvoon 1 μm . Levyllä on massana kuvattu impedanssi, levyn säteilyimpedanssi on reaalinen, suuruus 414 Rayls. Pelkän levyn absorptiosuhde on piirretty katkoviivalla.



Kuva 4. Keskimääräisen absorptiosuhteen muuttuminen materiaaliparametrien arvojen muuttuessa. Muuten samat variaatiot kuin edellisessä, mutta levyllä on myös jäykkyydestä riippuva impedanssi kaavan (7) mukaan ja säteilyimpedanssi on laskettu kaavan (5) mukaan.

5 TULOSTEN TARKASTELU

Ekvivalentti fluidi-malleja on tarkasteltu kirjallisuudessa laajalti [2, 3, 4, 8]. Mallit antavat käytännön tarpeita vastaten oikean kuvan huokoisen materiaalin absorptiosuhteesta. Kerrosrakenteiden osalta tarkasteluja on esitetty mm. viitteessä [3]. Tehdyt vertailut TAKU-hankkeessa vv. 1999-2002 mitattuihin vastaavien materiaalien arvoihin ovat olleet suotuisia ja absorptiomateriaalin mallinnustapaa voidaan pitää käyttökelpoisena. Luvussa 2.2 kuvatut levyrakenteen säteilyimpedanssin ja levyn impedanssin laskentamenetelmät ovat alan käsikirjoissa esitettyjä ja hyvin perusteltuja.

Suurin vaikutus yhdistelmän absorptiosuhteeseen on huokoisen materiaalin paksuudella. Ilmavälin kasvattaminen heikentää kokonaisabsorptiota puoliaallonpituuden minimien vuoksi. Pintakalvo on tarkastelun suurimmilla materiaali-paksuuksilla ja suurilla taajuuksilla merkittävä absorptiota heikentävä tekijä.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuvattu laskentamenetelmä on suhteellisen yksinkertainen toteuttaa. Suuria laskennallisia vaikeuksia ei tämän laajuudessa tarkastelussa kohdattu. Suorahakumenetelmää yhdistettynä kuvattuun kerrosrakenteen malliin voidaan pitää käyttökelpoisena tarkastelukeinona absorptiosuhteen hakemisessa. Tuloksia voidaan pitää kuvattun tarkastelun kannalta oikeina, vaikka suoraa vertailua mittaustulokseen ei voitu tässä tehdä.

Paras absorptiosuhde saavutetaan odotetusti, kun käytetään yhdistelmän kokonaispaksuuteen nähden paksua yhtenäistä materiaalia, jonka pinnassa oleva suojakalvo ei ole liian jäykkä tai massiivinen haitatakseen aaltoliikkeen etenemistä. Taustalevyn ja sen äänensäteilyn mallinnustavalla ei ole suurta merkitystä kokonaisuuden absorptiosuhteen kannalta.

Kiitämme Valtra Oy Ab:tä yhteistyöstä.

LÄHTEET

1. TANTTARI J, KATAJA J, Järjestelmätarkastelu ja optimointi vaimenninakustiikassa, *Akustiikkapäivät 2003*, 6.-7.10.2003, Turku.
2. DELANY M, BAZLEY E, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Appl Ac* 3(1970).
3. MECHEL F, Design charts for sound absorber layers, *J Acoust Soc Am* 87(1988)3.
4. MECHEL F, VER I, Sound absorbing materials, teoksessa BERANEK L, VER I, *Noise and vibration control engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1992, 216-230.
5. FAHY F, *Sound and structural vibration*, Academic Press, Lontoo, 1985.
6. MORSE P M, INGARD K U, *Theoretical acoustics*, Princeton University Press, Princeton, 1986, 392-394.
7. BACKMAN J, PELTONEN T, MÖLLER H, Kaiuttomien huoneiden kiilarakenne, *Akustiikkapäivät 2001*, 8.-9.10.2001, Espoo.
8. NOUSIAINEN E, HONGISTO V, LINDGREN M, Acoustic characterisation of fibrous materials using measured flow resistivity data, *Internoise 2000 proceedings*, 27.-30.8.2000, Nizza.