

# ABSORBOIVIEN MATERIAALIEN JA REIKÄLEVYJEN SKAALAUUS KANAVAÄÄNENVAIMENTIMIEN PIENOISMALLEIHIN

Seppo Uosukainen<sup>1)</sup>, Heikki Isomoisio<sup>1)</sup>, Jukka Tanttari<sup>1)</sup>, Esa Nousiainen<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> VTT  
PL 1000, 02044 VTT  
etunimi.sukunimi@vtt.fi

<sup>2)</sup> Wärtsilä Finland Oy  
PL 252, 65101 Vaasa  
etunimi.sukunimi@wartsila.com

## 1 JOHDANTO

Wärtsilä Finland Oy Power Plantsin E-Power -hankkeessa on VTT:n koneakustiikkalaboratorioon rakennettu akustinen mittaosputki. Putkea voidaan käyttää mm. kanavaäänenvaimentimien suorituskykyyn vaikuttavien ilmiöiden tutkimiseen. Tutkittavasta vaimentimesta tehdään pienoismalli skaalaamalla vaimentimen mitat kanavien halkaisijoiden suhteella. Pakokaasujen lämpötila voimalaitoksen pakokanavassa on tyypillisesti 360 – 400 °C, joten äänennopeus pakokanavassa on luokkaa 500 m/s. Pakokanavan merkityksellinen taajuusalue tulee skaalata pienoismalliin niin, että dimensioskaalaus ja putkien äänennopeuksien suhde otetaan huomioon. Skaalatulla taajuusalueella mitatun pienoismallin läpäisyvaimennuksen oletetaan olevan validi pakokanavan vaimentimelle sen alkuperäisellä taajuusalueella.

Vaimentimissa käytetään huokoisia materiaaleja keski- ja suuritaajuisten äänen vaimentamiseen. Materiaalit suojataan reikälevyllä. Pienoismalleissa kerrospaksuus määräytyy kokosuhteesta, koska vaimentimen topologia pyritään toistamaan tarkasti. Huokoisen materiaalin tai reikälevyn akustisiin ominaisuuksiin ei pienoismalleissa ole toistaiseksi kiinnitetty huomiota. Projektissa on todettu tarve kehittää menetelmä pienoismallissa käytettävän vaimennusmateriaalien ja reikälevyjen valitsemiseksi, jotta saataisiin samanlaiset akustiset ominaisuudet pakokanavan ja pienoismallin rakenteille niiden vastaavilla relevanteilla taajuusalueilla.

## 2 PERUSSKAALAUUS

Skaalauksen lähtökohtana on ennalta määriteltyjen lineaaristen dimensioiden ja lämpötilojen suhde. Perusskaalaus tehdään siten, että lineaaristen dimensioiden ( $l$ ) ja aallonpituuden ( $\lambda$ ) suhde säilyy muuttumattomana, jolloin ennalta asetettu dimensio- ja lämpötilaskaalaus pienoismallille määrittävät pienoismallille tarvittavan taajuusskaalauksen yksinkertaisesti.

Akustinen aaltoimpedanssi  $Z_A$  kanavassa on

$$Z_A = \frac{\rho c}{A}, \quad (1)$$

missä  $\rho$  on fluidin tiheys,  $c$  on äänen nopeus ja  $A$  on kanavan poikkipinta-ala. Skaalatut impedanssit eivät näin ollen ole samoja kuin alkuperäiset, mutta koska kaikki impedanssit skaalautuvat samalla tavoin, niiden keskinäiset suhteet skaalatussa järjestelmässä säilyvät ennallaan

verrattuna alkuperäisen järjestelmän impedanssisuhteisiin. Tämä takaa sen, että häviöttömän (reaktiivisen) vaimentimen pienoismallilla saatavat tulokset voidaan suoraan palauttaa oikeaan kokoon ja lämpötilaan esitetyn yksinkertaisen taajuusskaalauksen käänteisskaalauksella.

### 3 ABSORBOIVA MATERIAALI

Määritellään kompleksinen etenemiskerroin  $\Gamma$  ja akustinen aaltoimpedanssi  $Z_A$  häviöllisessä väliaineessa kaavoilla

$$\begin{aligned} \Gamma &= \alpha + j\beta & \alpha &= \operatorname{Re}\{\Gamma\} & \beta &= \operatorname{Im}\{\Gamma\} \\ Z_A &= R_A + jX_A & R_A &= \operatorname{Re}\{Z_A\} & X_A &= \operatorname{Im}\{Z_A\}, \end{aligned} \quad (2)$$

missä  $\alpha$  on vaimennusvakio,  $\beta$  on ”tavallinen” etenemiskerroin,  $R_A$  on akustinen aaltoreisitanssi ja  $X_A$  on aaltoreaktanssi. Suure  $\beta$  vastaa aaltolukua  $k = \omega/c = 2\pi f/c$  häviöttömässä kentässä ( $\omega = 2\pi f$  on kulmataajuus,  $f$  on taajuus).

Delany ja Bazley ovat esittäneet kuitumaiselle absorptiomateriaalille soveltuvat kompleksisen etenemiskertoimen ja aaltoimpedanssin lausekkeet [1, 2]. Mechel [3] on korjannut ne pienillä taajuuksilla paremmin toimivaan muotoon

$$\alpha + j\beta = k \cdot \begin{cases} 0.189C^{0.6185} + j(1 + 0.0978C^{0.6929}) & , C \leq 60 \\ \sqrt{-1.4664 + j0.2115C} & , C \geq 60 \end{cases} \quad (3)$$

$$R_A + jX_A = \frac{\rho c}{A} \cdot \begin{cases} (1 + 0.04885C^{0.754}) - j0.087C^{0.7307} & , C \leq 60 \\ \frac{C/(2\pi) + j1.4035}{\sqrt{-1.4664 + j0.2115C}} & , C \geq 60, \end{cases}$$

missä suure  $C$  on

$$C = \frac{r}{\rho f}, \quad (4)$$

missä  $r$  on materiaalin ominaisvirtausvastus [ $\text{Pas/m}^2$ ]. Tässä ala  $A$  viittaa absorptiomateriaalin poikkipinta-alaan.

Kompleksinen etenemiskerroin tulisi skaalata siten, että  $\Gamma l$  säilyy skaalauksessa. Koska perusskaalaus ei muuta suuretta  $kl$ , lausekkeista (3) (ylemmät) nähdään, että tämä johtaa vaatimukseen suureen  $C$  säilymisestä ennallaan skaalauksessa. Akustisen aaltoimpedanssin osalta termin  $\rho c/A$  skaalautuminen perusskaalauksessa toteuttaa impedanssisuhteiden säilymisen lausekkeissa (3) (alemmat), mikäli lausekkeiden loppuosat eli normeeratut impedanssit säilyvät ennallaan. Tämä johtaa samaan vaatimukseen kuin kompleksinen etenemiskerroin johti. Näin ollen skaalatun absorptiomateriaalin ominaisvirtausvastus  $r$  tulee valita siten, että lausekkeen (4) mukainen suure  $C$  säilyy skaalauksessa muuttumattomana.

## 4 REIKÄLEVY

Reikälevyn akustinen impedanssi voidaan esittää keskitettynä impedanssina muodossa

$$\begin{aligned}
 Z_{Ap} &= \frac{\rho c}{A} z = \frac{\rho c}{A} (r + j\omega l) = \frac{\rho c}{A} (r_p + r_e + j\omega l_p + j\omega l_e) \\
 r_p &= \frac{-\operatorname{Im}\{\rho_c / \rho\}kh}{p} & r_e &= \frac{-2\operatorname{Im}\{\rho_c / \rho\}kR(1-p)}{p} \\
 \omega l_p &= \frac{\operatorname{Re}\{\rho_c / \rho\}kh}{p} & \omega l_e &= \frac{\frac{\pi}{2}kRf_1(kR)f_2(p)}{p},
 \end{aligned} \tag{5}$$

missä  $h$  on reikälevyn paksuus,  $R$  on reikien säde ja  $p$  on reikäpinta-alasuhte (reikien pinta-ala / levyn koko pinta-ala). Resistanssi- ja reaktanssiosuuden ensimmäinen osa (alaindeksi  $p$ ) pohjautuu Maan [4, 5] esittämiin kaavoihin ja toinen osa (alaindeksi  $e$ ) päätekorjauksiin [6, 7, 8]. Kompleksinen tiheys  $\rho_c$  lausekkeissa (5) ottaa huomioon väliaineen viskoottiset häviöt

$$\frac{\rho_c}{\rho} = \left(1 - \frac{2}{x} \frac{J_1(x)}{J_0(x)}\right)^{-1} \quad x = \sqrt{-j2} \frac{R}{\delta_v} \quad \delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho}}, \tag{6}$$

missä  $J_0$  ja  $J_1$  ovat Besselin nollannen ja ensimmäisen kertaluvun funktiot,  $\delta_v$  on viskoottisen rajakerroksen paksuus ja  $\mu$  on viskositeettikerroin. Termi  $f_1$  on pienten argumenttien approksimaatiolla normeerattu ensimmäisen kertaluvun Struven funktio  $S_1(2kR)$ . Termi  $f_2$  on reikien keskinäisvaikutustermi Fokin mukaan [9], joka ottaa huomioon reikien keskinäisimpedanssin aiheuttaman päätekorjauksen reaktanssiosan pienenemisen reikäpinta-alasuhteen kasvaessa.

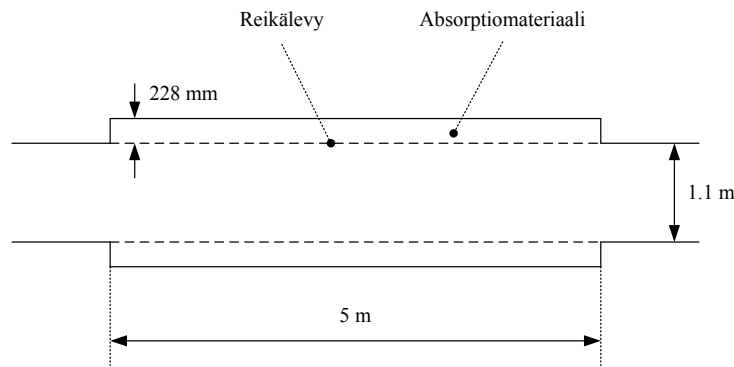
Reikälevyjen akustiset impedanssit skaalautuvat perusskaalauksessa oikeassa impedanssisuhteessa termin  $\rho c/A$  ansiosta lausekkeissa (5), mikäli ko. lausekkeiden loppuosat  $z = r + jx = r + j\omega l$  eli normeeratut impedanssit säilyvät muuttumattomina skaalauksessa. Tämän toteuttamiseen ei ole mitään suoraa menetelmää. Yksi tapa on minimoida esimerkiksi suureita

$$|r_1 - r_2| \quad |x_1 - x_2| \quad |z_1 - z_2| \quad |\arg(z_1) - \arg(z_2)| \tag{7}$$

kaikilla relevanteilla taajuuksilla esimerkiksi pienimmän neliösumman menetelmällä. Alaindeksi 1 liittyy alkuperäisen rakenteen ja alaindeksi 2 skaalatun rakenteen suureisiin ja taajuuksiin. Eri suureiden minimointi tuottaa erilaiset lopputulokset. Mahdollisia varioitavia parametreja ovat  $R$ ,  $h$  ja  $p$ .

## 5 LASKENTAESIMERKKI

Edellä esitettyjen periaatteiden mukaan on tehty MATLAB-ohjelma kanavien ja vaimentimien mitoittamiseksi pienoismalleissa. Laskentaesimerkiksi valittiin kuvan 1 mukainen sylinterimäinen vaimennin. Alkuperäisen ja skaalatun kanavan halkaisijat olivat 1100 mm ja 199.1 mm. Alkuperäisen ja skaalatun konfiguraation lämpötilat olivat 360 °C ja 20 °C. Alkuperäisen konstruktion absorptiomateriaalin ominaisvirtausvastus ja paksuus olivat 34300 Pas/m<sup>2</sup> ja 228 mm. Alkuperäinen reikälevy oli 3 mm paksu, reikien halkaisija oli 3 mm ja reikäpinta-alasuhte 30 %. Valittu alkuperäisen konstruktion taajuusalue oli 1 – 100 Hz.



Kuva 1: *Esimerkkivaimennin.*

### 5.1 Esimerkkivaimentimen skaalaus

Vaimentimen skaalatuksi pituudeksi saatiin 905 mm, skaalatuksi taajuusalueeksi saatiin 3.797 – 379.7 Hz sekä absorptiomateriaalin ominaisvirtausvastukseksi ja paksuudeksi saatiin 281 360 Pas/m<sup>2</sup> ja 41.3 mm. Nähdään, että pienoismallin ominaisvirtausvastusarvot saattavat olla hyvin suuria. Reikälevyn mitoitus tulokset eri suureita minimoimalla on esitetty taulukossa 1. Perusskaalauksen mukainen dimensioskaalaus tuottaisi reikälevyn reikähalkaisijaksi ja paksuudeksi 0.5 mm ja reikäpinta-alasuhteeksi alkuperäisen. Nähdään, että tässä esimerkissä eri kriteerit tuottavat toistensa lähellä olevia tuloksia ja perusskaalausta suurempia arvoja, paitsi reikäpinta-alasuhteelle vaiheoptimoinnin kautta. Vaiheoptimointi osoittautui huonoimmaksi vaihtoehdoksi muiden suureiden kannalta.

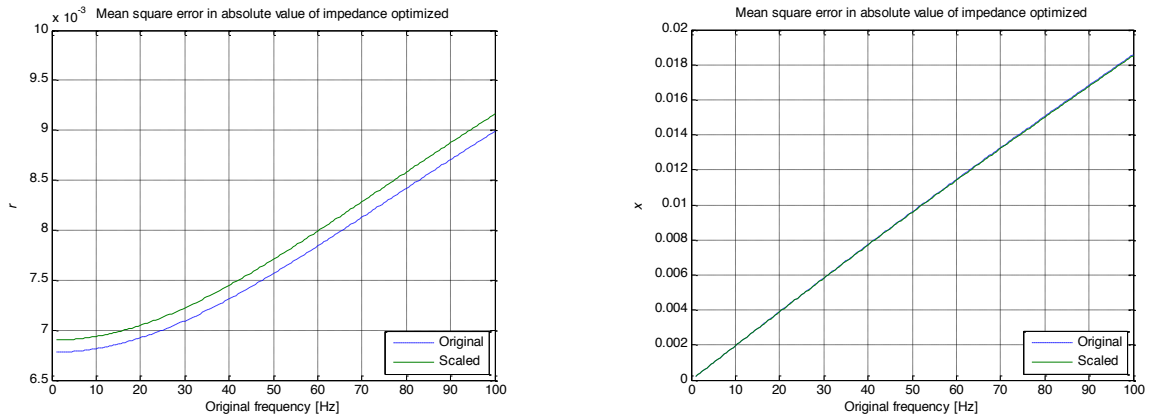
Taulukko 1: *Skaalattujen reikälevyjen parametrit, kun optimointi on tehty impedanssin magnitudiin, resistanssiin, reaktanssiin ja impedanssin vaihekulmaan pohjautuen.*

kriteeri	impedanssi (magn.)	resistanssi	reaktanssi	vaihe
reiän halkaisija [mm]	0.8	0.8	0.8	0.8
levyn paksuus [mm]	0.7	0.6	0.6	0.8
reikäpinta-alasuhte [%]	38	36	34	25

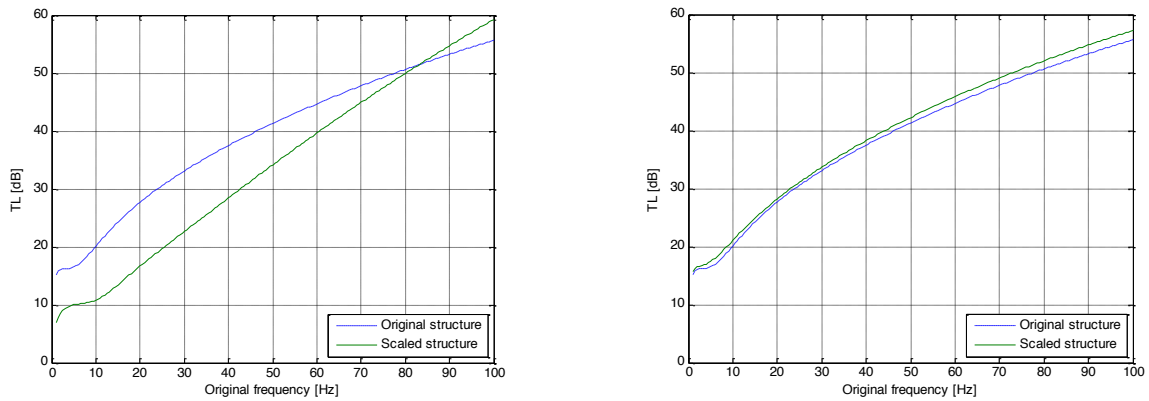
Kuvassa 2 on esitetty alkuperäisen ja skaalatun reikälevyn suhteellinen resistanssi ja reaktanssi alkuperäisen taajuus akselin kanssa, kun optimointisuurena on impedanssin magnitudi.

### 5.2 Lämpäisyvaimennuksen simulointi

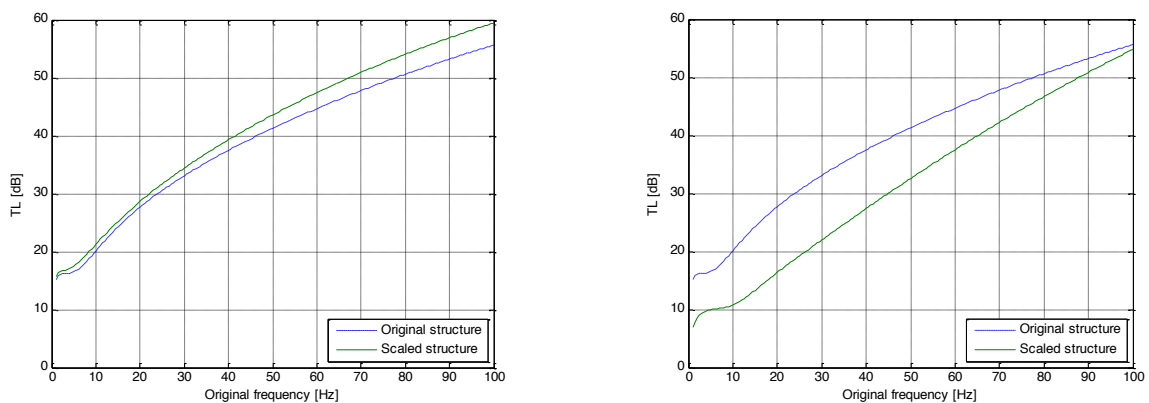
Alkuperäisten ja skaalattujen rakenteiden lämpäisyvaimennuksia simuloitiin SIDLAB-ohjelmalla. Alkuperäisen ja reikälevyn osalta impedanssin magnitudin optimoinnin perusteella skaalatun rakenteen lämpäisyvaimennus on esitetty kuvassa 3 (oikea). Reikälevyn resistanssin ja reaktanssin optimointiin perustuva skaalaus johtaa melkein samanlaisiin tuloksiin. Nähdään, että optimointi tuottaa hyvin samanlaiset lämpäisyvaimennukset kuin alkuperäisellä rakenteella on ja että ilman absorptiomateriaalin ja reikälevyn mitoitus skaalatun rakenteen lämpäisyvaimennus saattaa poiketa noin 10 dB alkuperäisen rakenteen vastaavasta pienillä taajuuksilla (kuva 3, vasen). Kuvasta 4 nähdään myös, että absorptiomateriaalin optimi mitoitus vaikuttaa huomattavasti enemmän kuin reikälevyn (jopa siinä määrin, että reikälevyn optimoinnista ei ole hyötyä, ellei absorptiomateriaalia ole mitoitettu oikein).



Kuva 2: Reikälevyn alkuperäinen ja skaalattu suhteellinen resistanssi ( $r$ ) ja reaktanssi ( $x$ ), kun impedanssin magnitudin virhe minimoidaan pienimmän neliösumman menetelmällä; taajuusakseli on alkuperäisen mukainen.



Kuva 3: Laskettu läpäisyvaimennus; skaalatun rakenteen reikälevy ja absorbentti ei optimoitu (vasen) ja optimoitu (oikea), reikälevy optimoitu impedanssin magnitudin perusteella; taajuusakseli on alkuperäisen mukainen.



Kuva 4: Laskettu läpäisyvaimennus; vain skaalatun rakenteen absorbentti (vasen) tai reikälevy (oikea) optimoitu; taajuusakseli on alkuperäisen mukainen.

## 6 YHTEENVETO

Skaalausperiaate absorboiville materiaaleille ja reikälevyille on esitetty kanavaäänenvaimentimien pienoismallien mitoitusta varten. Absorptiomateriaalien osalta periaate pohjautuu Mechelin korjaamaan Delany-Bazleyn malliin ja reikälevyjen osalta keskitettyyn impedanssimalliin. Skaalatun järjestelmän impedanssisuhteet vastaavat alkuperäisen rakenteen impedanssisuhteita. Absorbenttien ja reikälevyjen optimoitu skaalaus pienoismalleissa tuottaa lähes alkuperäistä rakennetta vastaavan läpäisyvaimennuksen; ilman ko. skaalausta pienoismallin läpäisyvaimennuksessa voi olla 10 dB luokkaa oleva virhe pienillä taajuuksilla. Absorptiomateriaalien optimoidulla skaalauksella on paljon merkittävämpi vaikutus tuloksiin kuin reikälevyjen skaalauksella. Skaalatuilta absorbenteilta edellytetään melko suuria ominaisvorausvastusten arvoja. Skaalatut reikälevyjen paksuudet, reikähalkaisijat ja reikäpinta- alasuhteet ovat suurempia kuin mitä perusskaalauksen mukainen dimensioskaalaus tuottaisi.

## VIITTEET

- [1] DELANY M E & BAZLEY E N, Acoustical characteristics of fibrous absorbent materials. *NPL Aero Report Ac* **37**(1969).
- [2] DELANY M E & BAZLEY E N, Acoustical characteristics of fibrous absorbent materials. *Appl Ac* **3**(1970), 105–116.
- [3] MECHEL F P, Ausweitung der Absorberformel von Delany und Bazley zu tiefen Frequenzen. *Acustica* **35**(1976), 210–213.
- [4] MAA D-Y, Microperforated-panel wideband absorbers. *Noise Control Eng J* **29**(1987)3, 77–84.
- [5] MAA D-Y, Potential of microperforated panel absorber. *J Acoust Soc Am* **104**(1998)5, 2861–2866.
- [6] BERANEK L L, *Acoustics*. McGraw–Hill Book Company, New York 1954.
- [7] INGARD U, On the theory and design of acoustic resonators. *J Acoust Soc Am* **25**(1953)6, 1037–1061.
- [8] MORSE P M & INGARD K U, *Theoretical Acoustics*. McGraw–Hill Book Company, New York 1968.
- [9] MELLING T H, The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels. *J Sound Vib* **29**(1973)1, 1–65.