

HUOKOISTEN MATERIAALIEN ABSORPTIOSUHTEEN LASKEMINEN VIRTAUSVASTUKSEN PERUSTEELLA

Esa Nousiainen, Valtteri Hongisto*

VTT Automaatio

Turvallisuustekniikka
Tekniikankatu 1
33101 TAMPERE
Esa.Nousiainen@vtt.fi

* Työterveyslaitos
Ilmastointi- ja akustiikkalaboratorio
Lemminkäisenkatu 14-18 B
20520 TURKU

1 TIIVISTELMÄ

Äänen etenemistä ja absorboitumista huokoisessa materiaalissa voidaan kuvata kun tunnetaan materiaalin kompleksinen etenemisvakio ja kompleksinen karakteristinen impedanssi. Eräs lähestymistapa huokoisten materiaalien etenemisvakion ja karakteristisen impedanssin määrittämiseksi ovat ns. empiiriset menetelmät. Näiden menetelmien soveltaminen edellyttää materiaalin virtausvastuksen mittaamista. Virtausvastuksen, väliaineen tiheyden ja etenevän aallon taajuuden funktiona esitetään materiaalin etenemisvakio ja karakteristinen impedanssi empiiristen kaavojen avulla. Tunnettuja menetelmiä ovat Delanyn ja Bazleyn menetelmä, Mechelin menetelmä joka laajentaa Delanyn ja Bazleyn menetelmän pätevyysaluetta matalille taajuuksille sekä Allardin ja Champouxin menetelmä.

Tämän työn tarkoitus oli vertailla erilaisten empiiristen mallien antamia ennusteita mineraalivillan absorptiosuhteelle ja selvittää mallien käyttökelpoisuutta sovelluksissa. Viiden eri huokoisen materiaalin (mineraalivilla, tiheys 20 kgm^{-3} ... 150 kgm^{-3}) ilmavirran virtausvastus määritettiin standardoidulla ilmavirran painehäviön mittaamisen perustuvalla menetelmällä. Mitatun virtausvastuksen perusteella määritettiin materiaalien etenemisvakio ja ominaisimpedanssi käyttäen Delanyn ja Bazleyn, Mechelin sekä Allardin ja Champouxin menetelmää.

Käytännön sovellutuksena laskettiin materiaalin normaalin ja diffuusin tulokulman akustinen absorptiosuhde. Laskettuja absorptiosuhteita verrattiin vakiomenetelmillä mitattuihin absorptiosuhteisiin. Normaalin tulokulman tapauksessa mitatut ja lasketut tulokset vastasivat toisiinsa hyvin. Diffuusin tulokulman tapauksessa lasketut tulokset eivät vastanneet kovin hyvin mitattua ns. Sabinen absorptiosuhdetta.

2 TEORIA

Zwikker ja Kosten kehittävät teoksessaan 'Sound Absorbing Materials' teorian aaltoliikkeen etenemisen kuvaamiseksi elastisessa huokoisessa aineessa [1]. Etenevä aalto voidaan kuvata vaimenevana sinimuotoisena aaltona

$$p(l) = p(0)\exp(-\gamma l) \quad (1)$$

$$v(l) = v(0)\exp(-\gamma l) \quad (2)$$

missä p on äänenpaine, v hiukkasnopeus, l etäisyys materiaalin pinnasta ja γ materiaalin etenemisvakio. Etenemisvakio esitetään usein muodossa $\gamma = \alpha + j\beta$, missä kompleksiluvun reaali-osa α on vaimenemisvakio ja imaginääriosa β vaihevakio.

Materiaalin karakteristinen impedanssi saadaan paineen ja hiukkasnopeuden osamääränä. Karakteristinen impedanssi merkitään muodossa $Z_0 = R + jX$. Jaksollisesti vaihtelevan paineen p ja hiukkasnopeuden v riippuvuus ajasta t ja paikasta l määräytyy nyt etenemisvakion ja karakteristisen impedanssin avulla [1]. Seuraavassa esitetään kolme empiiristä menetelmää etenemisvakion ja karakteristisen impedanssin määrittämiseksi. Kaikki kolme menetelmää edellyttävät materiaalin virtausvastuksen mittaamista.

2.1 Delanyn ja Bazleyn menetelmä

Englantilaiset Delany ja Bazley esittivät vuonna 1970 sittemmin laajalti käytetyt empiiriset potenssilait etenemisvakion ja karakteristisen impedanssin määrittämiseksi tunnettaessa virtausvastus. Delanyn ja Bazleyn mukaan γ ja Z_0 voidaan esittää taajuusriippuvan, dimensioton suureen $\rho_0 f / R_f$ avulla muodossa [2]:

$$\gamma = \left(j \cdot \frac{\omega}{c} \right) \left[1 + 0,0978 \left(\frac{\rho_0 f}{R_f} \right)^{-0,700} - j \cdot 0,189 \left(\frac{\rho_0 f}{R_f} \right)^{-0,595} \right] \quad (3)$$

$$Z_0 = \rho_0 c \left[1 + 0,0571 \left(\frac{\rho_0 f}{R_f} \right)^{-0,754} - j \cdot 0,0870 \left(\frac{\rho_0 f}{R_f} \right)^{-0,732} \right], \quad (4)$$

missä ρ_0 [kgm⁻³] on väliaineen tiheys, ω [1/s] kulmanopeus, f [Hz] taajuus ja R_f [MKS rayls/m] materiaalin ominaisvirtausvastus. Yhtälöt on saatu yli 200 mineraalivillanäytteen mittaustuloksista regressioanalyysin avulla. Delany ja Bazley pitävät yhtälöiden pätevyysalueena väliä $0,01 \leq \rho_0 f / R_f \leq 1,0$ [2].

2.2 Mechelin menetelmä

Saksalainen F. Mechel on laajentanut omien mittaussarjojensa perusteella Delanyn ja Bazleyn yhtälöiden pätevyysaluetta. Mittaamalla yli 70 erilaista mineraalivillanäytettä impedanssiputkella Mechel on saanut etenemisvakiolle ja karakteristiselle impedanssille seuraavat parametriesitykset [3]:

$$\gamma = \left(j \cdot \frac{\omega}{c} \right) \left[a \left(\frac{\rho_0 f}{R_f} \right)^{-\alpha'} - j \cdot \left(1 + a'' \left(\frac{\rho_0 f}{R_f} \right)^{-\alpha''} \right) \right] \quad (5)$$

$$Z_0 = \rho_0 c \left[1 + b' \left(\frac{\rho_0 f}{R_f} \right)^{-\beta'} - j \cdot b'' \left(\frac{\rho_0 f}{R_f} \right)^{-\beta''} \right], \quad (6)$$

missä parametrit a' , a'' , α' , α'' , b' , b'' , β' ja β'' riippuvat suureesta $\rho_0 f / R_f$ taulukon 1 mukaan [3].

Taulukko 1. Regressioparametrit etenemisvakion ja karakteristisen impedanssin määrittämiseksi Mechelin mukaan

$\rho_0 f / R_f$	a'	α'	a''	α''	b'	β'	b''	β''
$\leq 0,025$	0,396	0,458	0,135	0,646	0,0668	0,707	0,196	0,549
$> 0,025$	0,179	0,674	0,102	0,705	0,0235	0,887	0,0875	0,770

2.3 Allardin ja Champoux'n menetelmä

Johnson *et. al.* julkaisivat vuonna 1987 teorian huokoisten materiaalien viskositeetti-ilmiöiden taajuusriippuvuudesta [4]. Johnsonin työhön perustuen Allard ja Champoux esittävät omat empiiriset yhtälönsä huokoisen materiaalin etenemisvakion ja karakteristisen impedanssin määrittämiseksi [5]. Allard ja Champoux ottavat käyttöön taajuusriippuvan dynaamisen tiheyden $\rho(\omega)$ ja dynaamisen tilavuuskimmokertoimen $K(\omega)$. Näiden avulla Allard ja Champoux esittävät etenemisvakion γ ja karakteristisen impedanssin Z_0 muodossa:

$$\gamma(\omega) = j \cdot 2\pi f [\rho(\omega)/K(\omega)]^{1/2} \quad (7)$$

$$Z_0(\omega) = [\rho(\omega)K(\omega)]^{1/2} \quad (8)$$

Dynaamisen tiheyden ja tilavuuskimmokertoimen taajuusriippuvuus esitetään virtausvastuksen, väliaineen tiheyden ja taajuuden avulla käyttämällä suuretta $\rho_0 f / R_f$.

3 MENETELMÄT

3.1 Mittausmenetelmät

Mineraalivillanäytteiden ilmavirran virtausvastus mitattiin amerikkalaisen standardin ASTM C 522-87 mukaan. Menetelmässä mitataan ilmavirran painehäviö tunnetussa materiaalivahvuudessa ilmavirran virtausnopeutta kohti. Määritellään ominaisvirtausvastus

$$R_f = \frac{A \Delta p}{l U}, \quad (9)$$

Missä A on materiaalinäytteen pinta-ala [m^2], Δp painehäviö näytteessä [Pa], l näytteen paksuus [m] ja U ilmavirran tilavuusnopeus [m^3/s]. Painehäviön ja tilavuusnopeuden suhteen pysyessä vakiona pidetään virtausta materiaalin läpi lineaarisena ja lasketaan virtausvastus

mitattujen arvojen avulla kaavaa (9) käyttäen [6], [7], [8]. Virtausvastus määritettiin viiden eri näytteen keskiarvona ASTM-menetelmää käyttäen.

Virtausvastus voidaan mitata myös käyttäen Ingardin ja Dearin esittelemää akustisen virtausvastuksen menetelmää [9]. Tällä menetelmällä saadut arvot vastaavat ilmavirran virtausvastuksen arvoja hyvin. Akustisen virtausvastuksen arvot ovat tyypillisesti 10..15% pienempiä kuin ilmavirran virtausvastuksen arvot [7], [10].

Materiaalien normaalin ja diffuusin tulokulman absorptiosuhteet mitattiin standardimenetelmiä käyttäen seisovan aallon putkella ja kaiuntahuoneessa [11], [12].

3.2 Laskentamenetelmät

Kiinteästi seinää vasten asennetun absorptiomateriaalilevyn pinnan normaali akustinen ominaisimpedanssi voidaan laskea, kun tunnetaan etenemisvakio γ , karakteristinen impedanssi Z_0 ja materiaalin paksuus l . Materiaalin pintaimpedanssille saadaan esitys $Z = Z_0 \coth \gamma l$. Tietoa pintaimpedanssista voidaan käyttää hyväksi materiaalin ääneneristävyuden laskennassa ja kanavavaimentimien mitoituksessa. Tässä lasketaan materiaalin akustinen absorptiosuhde α . Normaalin tulokulman absorptiosuhteelle saadaan pintaimpedanssin avulla esitys [2], [3]:

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (10)$$

Tunnettaessa materiaalin pintaimpedanssi voidaan sen diffuusin tulokulman absorptiosuhde α_d (statistinen absorptiosuhde) laskea ns. Paris-kaavaa käyttäen [3].

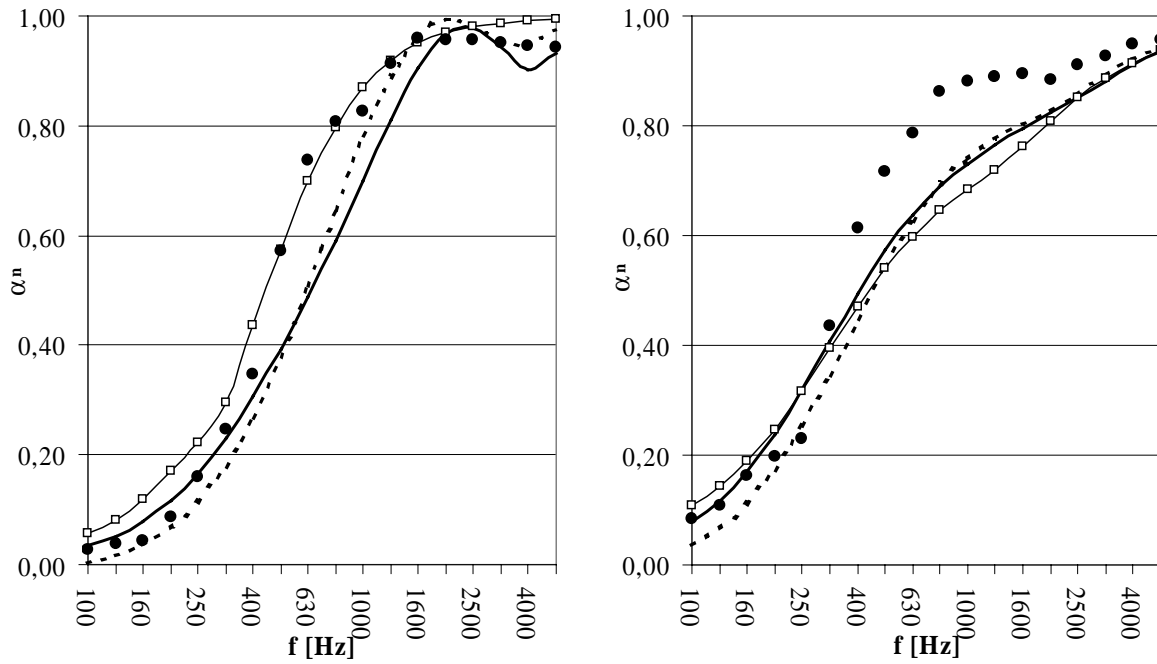
$$\alpha_d = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (11)$$

missä materiaali oletetaan ns. bulk-reagoivaksi. Bulk-reagoivassa materiaalissa aalto voi edetä myös pinnan normaalista poikkeavassa suunnassa. Tässä työssä laskettiin α_d Delanyn ja Bazleyn sekä Mechelin menetelmää käyttäen. Allard ja Champoux pitävät käyttämiään approksimaatioita pätevinä vain normaalille tulokulmalle [5]. Tässä työssä kokeiltiin Allardin ja Champouxin menetelmää myös diffuusin tulokulman absorptiosuhteen laskemiseen. Laskenta toteutettiin Matlab-ympäristössä.

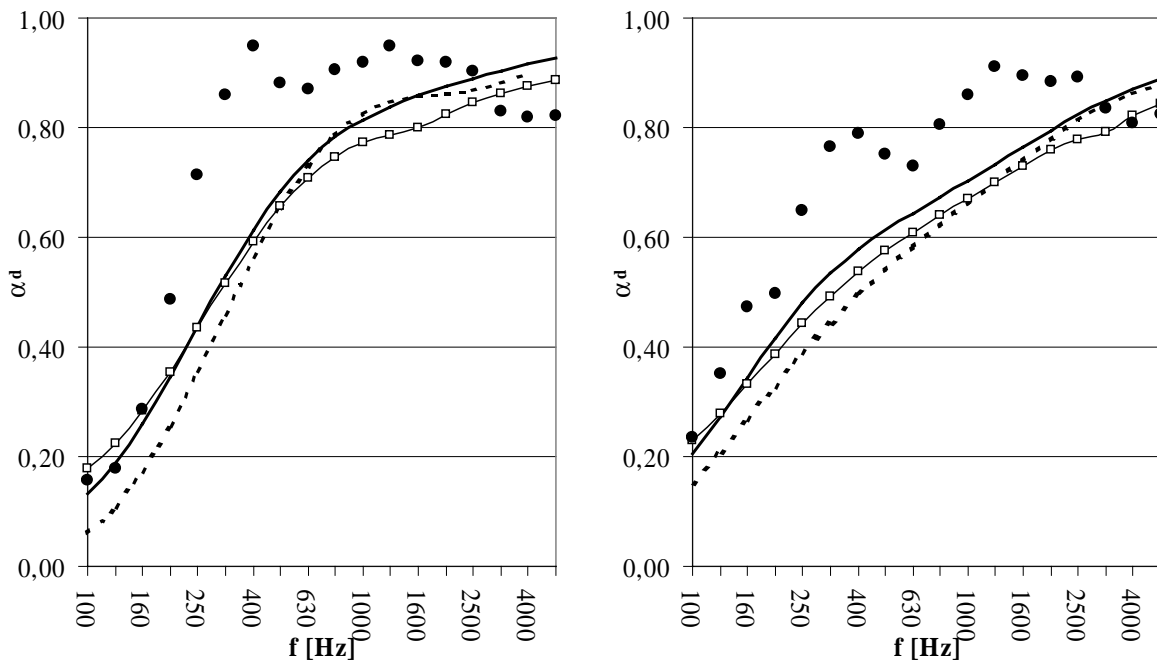
Menetelmien laskennan oikeellisuus verifioitiin vertaamalla saatuja tuloksia alkuperäisissä artikkeleissa esitettyihin tuloksiin [2], [3], [5]. Laskentamenetelmät on oikein toteutettu, koska tulokset vastasivat viitteiden esimerkkejä hyvin.

4 TULOKSET

Kuvassa 1 esitetään tulokset mineraalivillan normaalin tulokulman absorptiosuhteelle laskettuna kohtien 2.1, 2.2 ja 2.3 mukaan. Laskettua tulosta verrataan mitattuun arvoon. Kuvassa 2 esitetään tulokset diffuusin tulokulman absorptiosuhteelle. Laskettua tulosta verrataan kaiuntahuoneessa mitattuun arvoon.



Kuva 1. Normaalin tulokulman absorptiosuhde α_n . Avain: (-□- Mechelin menetelmä, - - - Delanyn ja Bazleyn menetelmä, — Allardin ja Champouxin menetelmä, • mittaustulos) Vasemmassa kuvassa materiaali lasivilla, $\rho = 20 \text{ kgm}^{-3}$, $R_f = 10000 \text{ MKS rayls/m}$. Oikeassa kuvassa materiaali lasivilla, $\rho = 45 \text{ kgm}^{-3}$, $R_f = 50000 \text{ MKS rayls/m}$



Kuva 2. Diffuusin tulokulman absorptiosuhde α_d . Avain (-□- Mechelin menetelmä, - - - Delanyn ja Bazleyn menetelmä, — Allardin ja Champouxin menetelmä, • mittaustulos) Vasemmassa kuvassa materiaali lasivilla, $\rho = 45 \text{ kgm}^{-3}$, $R_f = 50000 \text{ MKS rayls/m}$. Oikeassa kuvassa materiaali mineraalivilla, $\rho = 150 \text{ kgm}^{-3}$, $R_f = 100000 \text{ MKS rayls/m}$

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Normaalin tulokulman absorptiosuhde voidaan laskea riittävällä tarkkuudella huomioiden materiaalin epähomogeenisuus. Lasketut tulokset poikkeavat mitatusta enintään 20% joillakin taajuuskaistoilla. Menetelmien välillä ei ole suurta eroa. Mechelin menetelmä näyttää toimivan parhaiten pienillä virtausvastuksen arvoilla. Virtausvastuksen kasvaessa menetelmien väliset erot tasoittuvat, eikä yhtä menetelmää voida sanoa toista paremmaksi.

Diffuusin tulokulman tapauksessa laskettu (statistinen) absorptiosuhde poikkeaa merkittävästi mitatusta. Laskettu absorptiosuhde on laajalla taajuuskaistalla suuruudeltaan puolet mitatusta. Statistista absorptiosuhdetta voidaan pitää eri suurena kuin kaiuntahuonemenetelmällä mitattavaa Sabinen absorptiosuhdetta. Kaiuntahuonemenetelmän oletus äänen tulokulman tasaisesta jakautumisesta välillä $\theta: 0^\circ \dots 90^\circ$ ei välttämättä toteudu, varsinkaan pienissä kaiuntahuoneissa.

LÄHTEET

1. ZWIKKER C, KOSTEN C W, *Sound Absorbing Materials*. Elsevier, Amsterdam 1949
2. DELANY M E, BAZLEY E N, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Appl Acoust.* **3**(1970), 105–116
3. MECHEL F P, VER I, Sound absorbing materials and sound absorbers, teoksessa BERANEK L, VER I, (ed.), *Noise and Vibration Control Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1992
4. JOHNSON D L, KOPLIK J, DASHEN R, Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid saturated porous media, *J Fluid Mech*, **176**(1987) 379-402
5. ALLARD J-F, CHAMPOUX Y, New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, *J Acoust Soc Am* **91**(1992) 3346-3353
6. ASTM C522-87, Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials, American Society for Testing and Materials, New York
7. NOUSIAINEN E, *Virtausvastus kuitumaisten materiaalien akustisia ominaisuuksia määrävänä tekijänä*, Pro gradu- tutkielma, Turun Yliopisto, Fysiikan laitos, Turku, 2000
8. HELENIUS R, LINDGREN M, LAITINEN P, NOUSIAINEN E, HONGISTO V, Seinärakenteiden ääneneristävyyden mallinnuksessa tarvittavien parametrien mittaamenetelmät, *Akustiikkapäivät 2001*, 8.-9.10.2001, Espoo
9. INGARD K U, DEAR T, Measurement of acoustical flow resistance, *J Sound Vib* **103**(1985), 567-572
10. NOUSIAINEN E, HONGISTO V, LINDGREN M, Acoustical characterization of fibrous materials by using measured flow resistivity data, *Proceedings of INTERNOISE2000*, 27.-30. August 2000, Nice, France, 3875-3878.
11. ASTM C384-90a, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method, American Society for Testing and Materials, New York
12. ASTM C423-90a, Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method, American Society for Testing and Materials, New York