



GRANULIUOTŲ MEDŽIAGŲ GARSO SUGERTIES PROGNOZAVIMAS IR VERTINIMAS

Tomas Astrauskas¹, Raimondas Grubliauskas²

¹VGTU Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra

²VGTU Aplinkos apsaugos institutas

E-paštas: ¹tomas.astrauskas@vgtu.lt; ²raimondas.grubliauskas@vgtu.lt

Anotacija. Popieriaus gamybos dumblas – tai popieriaus pramonės įmonėse susidaranti nuotekų valymo atliekos. Šioms atliekoms tvarkyti skiriama vis daugiau dėmesio, todėl mokslininkai ieško būdų, kaip efektyviau galima būtų jas panaudoti. Kuriant naujas ir tobulinant esamas garsą sugeriančias medžiagas, yra nuolat vykdomi moksliniai tyrimai. Šiomis dienomis ypač kreipiamas dėmesys į natūralias ar pakartotinai naudotinas medžiagas, kurios galėtų būti modifikuotos kaip garsą sugeriančios medžiagos. Viena iš porėtų medžiagų rūšių yra granuliuotos medžiagos. Granuliuotų porėtų medžiagų garso sugerties (α) prognozavimas atliekamas fizikiniais skaitiniais Horoshenkov ir Swift, Champoux-Allard modeliais. Šiems modeliams reikalingi eksperimentinių orinės varžos tyrimų rezultatai. Šiame darbe atliktas trijų skirtingų granuliuotų medžiagų: deginto molio, popieriaus gamybos dumblo ir gumos granuliuotų orinės varžos palyginimas, esant vienodam granuliuotų dalelių dydžiui. Gauti duomenys rodo, kad didžiausia orinė varža, palyginti su kitomis tirtosiomis medžiagomis, yra popieriaus gamybos dumble ($4,1 \text{ K Pa s/m}^2$). Tokių medžiagų garso sugerties koeficientas α esant 10 cm storio mėginiui siekia 0,57–0,82.

Reikšminiai žodžiai: garso sugerties koeficientas, granuliuota terpė, orinė varža, popieriaus gamybos dumblas.

Įvadas

Popieriaus industrijos sektorius yra vienas iš labiausiai taršių industrinių sektorių. Šis sektorius aprašomas kaip vienas didžiausių energijos ir vandens vartotojų (Pokhrel ir Viraraghavan, 2004). Popieriaus gamybos dumblas, susidarantis nuotekų tvarkymo procese, siekia nuo 0,3 iki 1 m^3 dumblo nuo 1 t pagaminto popieriaus (Priadi, Rahmatika, Moersidik ir Setyo, 2014).

Popieriaus gamybos dumblas yra didžiausia dalis (apie 35 % nuo pagaminamo popieriaus) iš susidarantių atliekų šioje pramonės šakoje (Frías, Rodríguez ir Sánchez de Rojas, 2015). Europos Sąjungoje kas metus pagaminama 93 mln. t . (European Commission, 2013), o prognozuojama, kad popieriaus gamybos apimtys artimiausiu metu nesikeis. Remiantis mokslininko M. Friaso kartu su kitais autoriais parengtu straipsniu (2015), ES kasmet susidaro 32,5 mln. t . popieriaus gamybos dumblo. Lietuvoje kasmet pagaminama apie 130 tūkst. t . popieriaus ir jo gaminių t . y. susidaro 45,5 tūkst. t . popieriaus gamybos dumblo (Frías ir kt., 2015).

Įvairios kietosios atliekos ir dumblas susidaro skirtinguose minkštosios masės ir popieriaus gamybos pramonės technologinių procesų etapuose. Pagrindinis popieriaus gamybos dumblo susidarymo šaltinis yra mechaninis ir biologinis nuotekų valymas. Kietosios atliekos ir dumblas, susidarantys popieriaus gamyboje, gali būti skirstomi į pirminį dumblą (perdirbto popieriaus atliekas) ir antrinį (rašalo šalinimo atliekų dumblas). Pirminis dumblas susurenkamas gravitacijos nusodinimo būdu. Pirminio dumblo sudėtyje yra lignoceliuliozės komponentų (celiuliozės, hemiceliuliozės ir lignino), popieriaus gamybos užpildų (kaolino ir kalcio karbonato) (Ochoa de Alda, 2008; Kairytė, 2017).

Rašalo šalinimo atliekų dumblas – šios rūšies dumblas yra sudarytas iš trumpų plaušelių arba plaušo dalelių, rašalo dalelių (potencialus sunkiųjų metalų šaltinis), popieriaus perdirbimo ir dažų nuėmimo tirpalų liekanų. Šis dumblas, kaip atlieka, generuojamas perdirbant popierių. Dažai bei kitos priemaišos perdirbimo metu yra atskiriami flotacijos būdu. Rašalo šalinimo atliekų dumble yra dažų,

celiuliozės plaušų (mažos plaušų dalelės, kurių filtrai „nesugauna“) (Monte, Fuente, Blanco ir Negro, 2009; Jackson, Line, Wilson ir Hetherington, 2000).

Viena iš pagrindinių tiriamųjų sričių, susijusių su popieriaus gamybos dumbly, yra jo taikymas statybose. Dauguma tyrimų šioje srityje atliekami maišant popieriaus gamybos dumblą su cementu arba moliu siekiant sukurti naujos kartos plytas ar blokelių statybų industrijos sektoriui. Remiantis kitų autorių tyrimais naudojant popieriaus gamybos dumblo kompozitinę plytą galima pasiekti 50 % mažesnę šiluminį laidumą (Frías ir kt., 2015; Sutcu ir Akkurt, 2009; Goel ir Kalamdhad, 2017; Sarkar, Kurar, Gupta, Mudgal ir Gupta, 2017; Munir, Kazmi, Wu, Hanif ir Khan, 2018). Popieriaus gamybos dumblo, kaip akustinės medžiagos, panaudojimo žinios yra ribotos.

Pagrindinė neakustinė medžiagų savybė, lemianti medžiagos garso sugerties potencialą, yra medžiagos orinė varža. Granuliuotos medžiagos, tokios kaip ir mineralinė vata ar akustiniai porolonai, yra laikomos porėtomis ir jų akustinę varžą ir galiausiai garso sugertį galima prognozuoti gerai žinomomis akustinių savybių modeliavimo formulėmis (Delany-Bazley ir Miki models) (Delany ir Bazley, 1970; Miki, 1990; Pfretzschner, 2002). Tačiau vėlesni autoriai pasiūlė naują formulę, kuria būtų įvertintas granuliuotų medžiagų porų pasiskirstymas (Horoshenkov ir Swift, 2002; Horoshenkov, 2017). Pasiūlytoje formulėje charakterizuojant granuliuotas medžiagas reikia įvertinti orinę varžą σ , poringumą ϕ , lenktumą (angl. *tortuosity*) α_{∞} .

Skirtingos granuliuotos medžiagos dėl skirtingos granuliuotų formos garsą sugeria skirtingai. Kadangi neįmanoma, kad granulės sugultų idealiai lygiai viena ant kitos per visą mėginio plotą, todėl orinė varža ir garso sugertis įvairiose mėginio ploto vietose bus skirtinga (Brzinski, Mayor ir Durian, 2013; Horoshenkov, 2017). Akustiniu požiūriu daug nagrinėtos yra gumos ir smėlio granulės (Sukontasukkul, 2009; Pfretzschner ir Rodriguez, 1999; Gayathri, Vasanthakumari ir Padmanabhan, 2013; Shumway, 1960; Urick, 2005; Pfretzschner, 2002). Kaip ir bet

kokios porėtos medžiagos, granuliuotų medžiagų garso sugertis priklauso nuo orinės varžos ir medžiagos storio. Orinė varža granuliuotose medžiagose priklauso nuo granuliuotų dalelių formos. Jei dalelės bus taisyklingos formos, jos sudarys mažiau tarpų orui pratekėti, todėl bus gaunama didesnė orinė varža, o tuo pačiu ir granuliuotos medžiagos garso sugertis (Pfretzschner, 2002).

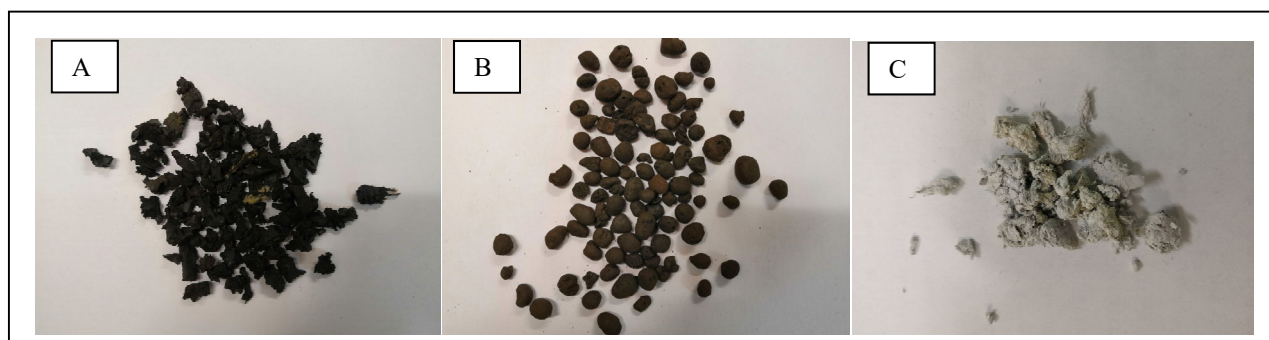
Šio darbo tikslas – nustatyti popieriaus gamybos dumblo granuliuotos medžiagos garso sugertį ir palyginti su tradicinėmis granuliuotomis medžiagomis.

Metodika

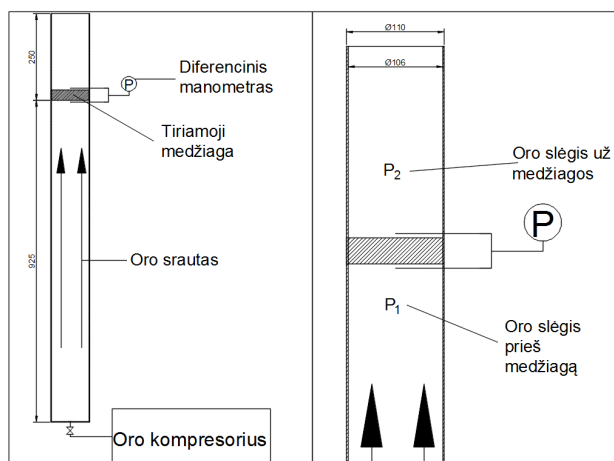
Tyrimai sudaryti iš dviejų dalių: eksperimentinės ir teorinių skaičiavimų dalies. Popieriaus gamybos dumblo, deginto molio ir gumos granuliuotų orinė varža buvo nustatyta eksperimentiškai, o medžiagos garso sugertis nustatyta teoriniais skaičiavimais remiantis, K. V. Horoshenkovo ir M. J. Swifto modeliu bei perforacijos efektyvumo skaičiavimo modeliais.

Prieš atliekant eksperimentinius orinės varžos tyrimus granuliuotos medžiagos buvo išsijotos ir atrinktos tik 5–10 mm frakcijos dalelės. Mėginių pavyzdžiai pateikti 1 paveiksle.

Medžiagų orinei varžai nustatyti naudojamas tiesioginio oro srauto metodas. Šis metodas remiasi kryptingo oro judėjimu sukuriama oro slėgio skirtumu tarp dviejų atvirų medžiagos paviršių. Stendo vamzdžio ilgis turi būti pakankamai ilgas, kad užtikrintų artimą laminariniam kryptingą oro srautą. Bandinio laikiklį sudaro 50 % skerspjūvio ploto tolygiai išdėstytos atviros skylės, kurių diametras yra 10 mm. Slėgiui sukelti naudojamas oro kompresorius, o slėgio skirtumui matuoti naudojamas diferencialinis manometras *Retrotec DM32*, kurio tikslumas siekia 0,1 Pa. Oro srauto greitis matuojamas oro srauto greičio matuokliu *Testo 452*. Oro srauto greitis įrenginyje buvo 0,23–0,27 m/s siekiant, kad oro srauto greitis nedarytų įtakos susidarančio slėgio skirtumui prieš ir už medžiagos. Metodas paremtas ISO 9053 standartu.



1 paveikslas. Tiriamosios medžiagos A – gumos granulės, B – deginto molio granulės, C – popieriaus gamybos dumblo granulės



2 paveikslas. Medžiagų orinei varžai nustatyti naudojamo prietaiso principinė schema

Tam, kad būtų nustatyta orinė varža iš pradžių nustatomas oro slėgio skirtumas ΔP ir oro judėjimo greitis v .

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (1)$$

čia: ΔP – slėgių skirtumas, Pa; P_1 – oro slėgis prieš mėginį, Pa; P_2 – oro slėgis už mėginio, Pa.

Skaiciuojamas oro pasipriešinimas R (ISO 9053:1991):

$$R = \frac{\Delta P}{qv}, \quad (2)$$

čia q – oro debitas, pratekantis prieš mėginį, m^3/s .

Toliau skaičiuojamas specifinis oro pasipriešinimas R_S , kuris apibrėžiamas kaip oro pasipriešinimo ir bandinio skerspjūvio ploto sandauga.

$$R_S = RA, \quad (3)$$

čia A – bandinio skerspjūvio plotas.

Galiausiai medžiagos **statinė orinė varža** σ apskaičiuojama, kaip specifinio oro pasipriešinimo R_S ir bandinio storio d santykis:

$$\sigma = \frac{R_S}{d}, \quad (4)$$

čia d – bandinio storis, m.

Porėtos medžiagos garso sugertis skaičiuojama pagal K. V. Horoshenkovo ir M. J. Swifto granuliuotų medžiagų garso sugerties fizikinį modelį. Pagrindiniai medžiagos parametrai, nusakantys granuliuotos medžiagos gebą sugerti garsą, yra orinė varža, akustinis lenktumas ir poringumas.

$$k = \omega \sqrt{\alpha_\infty \rho_0 / \gamma P_0}, \quad (5)$$

čia: k – kompleksinis bangos numeris, ω – kampinis dažnis rad/s, α_∞ – lenktumas, ρ_0 – oro tankis kg/m^3

$\rho_0 = 1,213 \text{ kg/m}^3$, P_0 – atmosferos slėgis Pa, $P_0 = 1,213 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, γ – specifinės šilumos konstantų santykis normalinėmis sąlygomis $\gamma = 1,4$. Oro tankis ir atmosferos slėgis priimami

Skaiciuojant medžiagos lenktumą, įvertinamas teorinis granuliuotos tipinės medžiagos poringumas esant taisyklingos formos granulėms. Medžiagos poringumas priimamas iš kitų autorių gautų rezultatų (1 lentelė).

1 lentelė. Skirtingų dalelių dydžių granuliuotos medžiagos poringumas (Ciantia, Arroyo, Butlanska ir Gens, 2016)

Dalelių dydis	Poringumas ϕ
5 mm	0,5
2,5 mm	0,45
1,25 mm	0,32
0,63 mm	0,23
<0,63 mm	0,21

Medžiagos lenktumas skaičiuojamas kaip dydis, tiesiogiai priklausantis nuo granuliuotos medžiagos poringumo.

$$\alpha_\infty = 1 + \frac{1 - \phi}{2\phi}, \quad (6)$$

čia: α_∞ – lenktumas, ϕ – medžiagos poringumas, %

Remiantis Champoux-Allardo modeliu, efektyvusis tankis apskaičiuojamas pagal formulę (Allard, Depollier ir Guignouard, 1989; Panneton ir Olny, 2006):

$$\rho_e = k_s \rho_0 \left[1 + \frac{\sigma \varepsilon}{j \omega k_s \rho_0} \sqrt{1 + \frac{4 k k_s^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \varepsilon^2}} \right], \quad (7)$$

čia: ρ_e – efektyvusis tankis, k_s – lenktumas (angl. *tortuosity*), η – klampumas, Λ – charakteringas dalelės ilgis.

Tuo pačiu modeliu skaičiuojamas oro tampros dinaminis modulis (Sánchez-Organ, Denia, Baeza ir Kirby, 2019):

$$K_e = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) / \left(1 + \frac{8 \eta}{j \Lambda^2 N_p \omega \rho} \sqrt{1 + \frac{j \rho \omega N_p \Lambda^2}{16 \eta}} \right)}, \quad (8)$$

čia: γ – specifinių šiluminių talpų santykis, P_0 – atmosferos slėgis, Pa, N_p – pataisos koeficientas (0,77).

Iš šių dviejų modelių galima išvesti supaprastintą charakteristinės medžiagos akustinės varžos išraišką:

$$Z_c = \sqrt{K_e \rho_e}. \quad (9)$$

Garso sklaida daugiasluoksniuose porėtose sistemose, kurios yra apibūdinamos standžiu paviršiumi, gali būti aprašyta:

$$Z_s = -j \frac{Z_C}{\varphi} \cot(kd), \quad (10)$$

čia: Z_s – specifinė medžiagos akustinė varža Pas/m^3 , k – kompleksinis bangos numeris i sluoksnyje, d – bandinio storis, m.

Medžiagos absorbcijos koeficiento skaičiavimui naudojamas atspindžio koeficiento ir medžiagos akustinės varžos sietis (Doutres, Salissou, Atalla ir Panneton, 2010).

$$R = \frac{\frac{z_s}{\rho_0 c_0} \cos(f) - 1}{\frac{z_s}{\rho_0 c_0} \cos(f) + 1}, \quad (11)$$

čia R – garso atspindžio koeficientas.

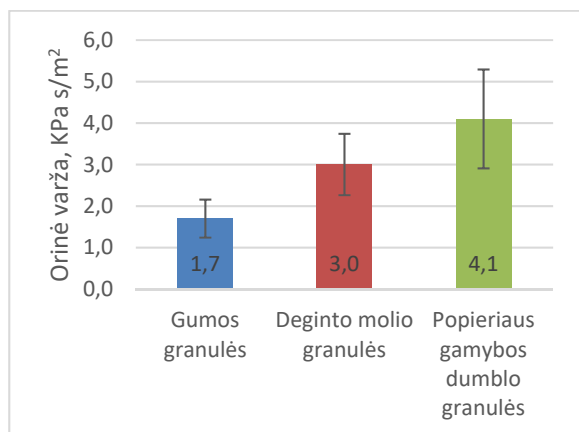
Teorinis garso sugerties koeficientas (α) skaičiuojamas pagal formulę (Panneton, 2017):

$$\alpha = 1 - |R|^2, \quad (12)$$

čia α – garso sugerties koeficientas.

Rezultatai

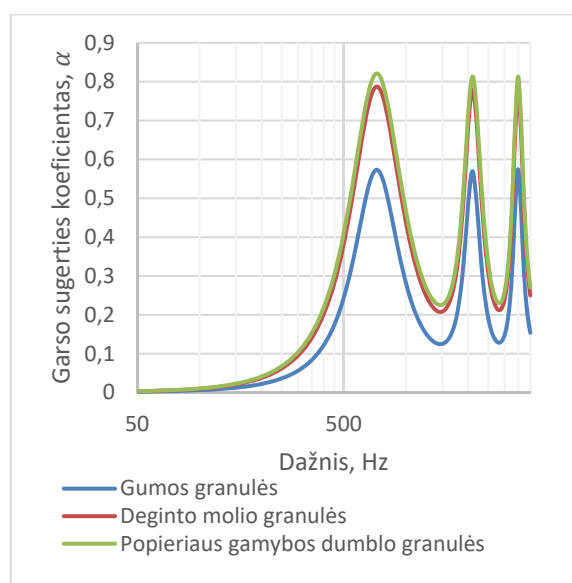
Atlikus eksperimentinius tyrimus, buvo nustatyta trijų skirtingų granuliuotų medžiagų orinė varža, iš kurių vėliau skaičiuojama jos normalinio bangos kritimo kampo garso sugertis.



3 paveikslas. Skirtingų granuliuotų medžiagų orinės varžos tyrimo rezultatai

Eksperimentiniai orinės varžos tyrimai rodo (3 paveikslas), kad deginto molio ir popieriaus gamybos dumblo orinė varža yra didesnė, palyginti su rezultatais, gautais naudojant gumos granules. Granuliuotų medžiagų

orinė varža priklauso nuo terpės poringumo. Skirtingą granuliuotų medžiagų terpės poringumą lemia dalelių forma. Tirtosios granuliuoto deginto molio dalelės yra taisyklingos skritulio formos – tai dalelės, kurios granuliuotoje terpėje sugula geriausiai. Popieriaus gamybos dumblo granulės buvo artimos skritulio formai, – tai elipsės formos dalelės su trumpais celiuliozės plaušeliais. Nustatyta popieriaus gamybos dumblo orinė varža – didesnė orinė varža ($4,1 \text{ KPa s/m}^2$), palyginti su deginto molio rezultatais ($3,0 \text{ KPa s/m}^2$), gali būti susijusi su šių plaušelių būvimu užpildant granuliuotos terpės poras. Tirtųjų gumos granuliuotų terpės orinė varža yra ženkliai mažesnė ($1,7 \text{ KPa s/m}^2$), tai yra paaiškinama tuo, kad dauguma gumos granuliuotų dalelių buvo tetraedro formos.

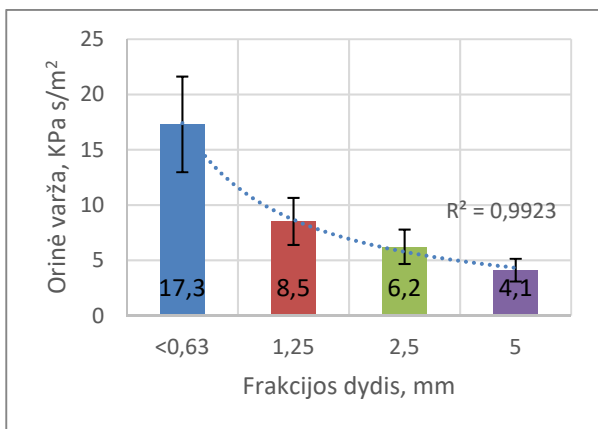


4 paveikslas. Apskaičiuoti granuliuotų medžiagų garso sugerties koeficientai

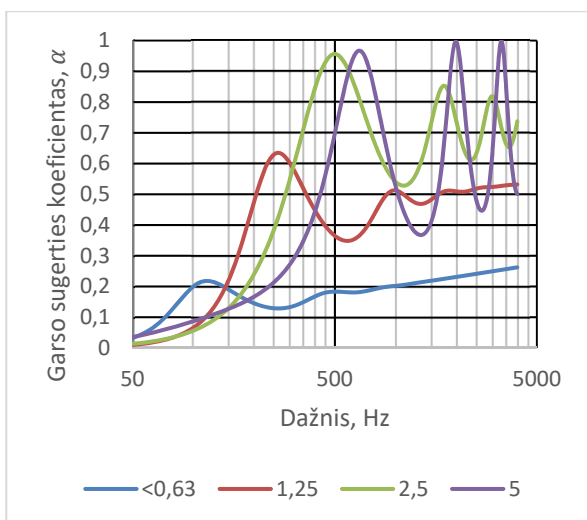
4 paveiksle pateikti granuliuotų medžiagų garso sugerties koeficientai. Garso sugertis buvo prognozuojama 50–4000 Hz oktavos dažnių juostose. Kadangi vienintelis kintamasis skaičiavimuose buvo tik orinė varža, todėl 2 paveiksle pateikti duomenys koreliuoja su 3 paveiksle pateiktais duomenimis. Didžiausia garso sugertis nustatyta ties 710 Hz, o α koeficientas siekė 0,82 (Popieriaus gamybos dumblo granulės), 0,79 (Deginto molio granulės), 0,57 (Gumos granulės).

Kadangi popieriaus gamybos dumblo granulės pirmiame tyrime parodė aukščiausias orinės varžos vertes, todėl buvo nuspręsta jas panagrinėti detaliau. 5 paveiksle pateikta orinės varžos priklausomybė nuo granuliuotų dalelių dydžio. Grafike matyti, kad didėjant dalelių frakcijos dydžiui orinė varža mažėja. Taip yra todėl, kad mažėjant dalelėms didėja granuliuotos medžiagos tankumo santykis,

todėl terpėje susidaro mažesnės poros ir tai daro įtaką orinei varžai. Palyginus mažesnių nei 0,63 mm ir 5 mm orinės varžos vertes, rezultatai skiriasi 4,2 karto.



5 paveikslas. Orinės varžos priklausomybė nuo popieriaus gamybos dumblo dalelių frakcijos dydžio



6 paveikslas. Skirtingos frakcijos popieriaus gamybos dumblo granuliuotų garso sugertis

6 paveiksle pateikiamos apskaičiuotų normalinės garso sugerties koeficientai pagal K. V. Horoshenkovo ir M. J. Swifto granuliuotų medžiagų garso sugerties modelį (2002). Paveiksle matyti, kad skirtingų frakcijų dalelės aukštesniuose nei 500 Hz dažniuose veikia skirtingai. Šis fizikinis reiškinys yra lemiamas dėl skirtingo medžiagų lenktumo (angl. *tortuosity*). Medžiagos lenktumas šiame modelyje priklauso nuo dalelių dydžio ir poringumo.

2 lentelėje pateikiamos popieriaus gamybos dumblo skirtingų frakcijų lyginamosios garso sugerties koeficiento vertės. Nustatyta, kad lyginamoji garso sugerties koeficiento vertė, esant 1,25–2,5 mm ir 5–10 mm frakcijoms, yra tokia pati $\alpha_w = 0,50$, o optimali vertė gauta esant 2,5–5 mm frakcijai – $\alpha_w = 0,55$.

2 lentelė. Skirtingų frakcijų popieriaus gamybos dumblo lyginamosios garso sugerties vertės α_w

Dalelių dydis, mm	α_w	Garso sugertis oktavos dažniuose, Hz				
		250	500	1000	2000	4000
<0,63	0,20	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25
1,25–2,5	0,50	0,65	0,35	0,50	0,50	0,55
2,5–5	0,55	0,40	0,95	0,55	0,75	0,75
5–10	0,50	0,20	0,70	0,55	1,00	0,50

Diskusija

Eksperimentinio orinės varžos tyrimo paklaidos yra sąlygiškai didelės, palyginti su gautuoju rezultatu. Tyrimas buvo atliekamas remiantis ISO standarto metodika, pagal kurią rekomenduojama kiekvienam bandiniui atlikti tris pakartotinius matavimus. Gavus rezultatus, matyti, kad tiriant granuliuotos terpės orinę varžą reikia atlikti daugiau pakartojimų tam, kad būtų pasiektas didesnis rezultatų patikimumas. Standartinė metodika granuliuotos terpės orinės varžos tyrimams netinka todėl, kad dalelės įdėjus į tyrimo stendą jos sukrenta atsitiktinai ir gali susidaryti tankesnės ir ne tokios tankios mėginio vietos. Kadangi dalelės nėra idealiai vienodo dydžio, skirtingose mėginio vietose gali patekti skirtingo dydžio dalelių.

Prognozuojant mėginių garso sugertį, buvo įvertintas vienodas mėginio storis (10 cm), todėl garso sugerties koeficiento reikšmių maksimumai ir minimumai yra tuose pačiuose dažniuose. Jeigu skaičiavimų metu būtų parinktas skirtingas bandinio storis, maksimumai būtų nustatyti kituose dažniuose.

Garso sugertis žemesniuose dažniuose yra artima nuliui todėl, kad garso sugertis didėja, kai medžiagoje didėja oro dalelių greitis. Dalelių greitis esant standžiam paviršiui (šiuo atveju granuliuotos terpės) dažniausiai būna artimas nuliui, o didžiausi greičiai pasiekiami esant 1/4 ir 1/8 bangos ilgio atstumui nuo paviršiaus. Dėl šios priežasties projektuojant įvairių garsą sugeriančių medžiagų paviršių labai svarbu įvertinti medžiagos storį.

Atliekant tyrimą nebuvo vertinamas skirtingų medžiagų poringumo pokytis dėl dalelių formos ar sukibimo, todėl skaičiuojami kiti medžiagų neakustiniai parametrai buvo įvertinti kaip konstanta, remiantis kitų mokslininkų duomenimis. Norint detaliau prognozuoti tirtųjų granuliuotų medžiagų garso sugertį, reikėtų tirti arba modeliuoti granuliuotos terpės poringumą.

Išvados

Atlikus orinės varžos tyrimą nustatyta, kad iš trijų pasirinktų granuliuotų medžiagų aukščiausios vertės buvo nustatytos naudojant popieriaus gamybos dumblą (3,3 K Pa s/m²) ir deginto molio granules (3,0 K Pa s/m²). Mažiausia orinė varža nustatyta naudojant gumos granules (1,7 K Pa s/m²), kurios buvo netaisyklingos formos.

Atliekant orinės varžos tyrimą su granuliuotomis medžiagomis gaunamos sąlygiškai didelės paklaidos, jei naudojamosi standartine metodika. Pastebėta, kad tiriant granuliuotas medžiagas reikia atlikti daugiau pakartojimų, nei nurodyta standartinėje metodikoje.

Atlikus teorinį prognozavimą nustatyta, kad esant 10 cm storio mėginiui didžiausia garso sugertis yra ties 710 Hz, o α koeficientas siekė 0,82 (Popieriaus gamybos dumblas), 0,79 (Deginto molio granulės), 0,57 (Gumos granulės).

Atlikus lyginamojo garso sugerties koeficiento vertės α_w skaičiavimus nustatyta, kad aukščiausios vertės buvo esant didesnėms kaip 2,5–5 mm ir 5–10 mm skersmens dalelėms.

Literatūra

- Allard, J. F., Depollier, C., & Guignouard, P. (1989). Free field surface impedance measurements of sound-absorbing materials with surface coatings. *Applied Acoustics*, 26(3), 199-207. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(89\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0003-682X(89)90053-4)
- Brzinski, T. A., Mayor P., & Durian, D. J. (2013). Depth-dependent resistance of granular media to vertical penetration. *Physical Review Letters*, 111(16), 168002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.168002>
- Ciantia, M. O., Arroyo, M., Butlanska, J., & Gens, A. (2016). DEM modelling of cone penetration tests in a double-porosity crushable granular material. *Computers and Geotechnics*, 73, 109-127. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.12.001>
- Delany, M. E., & Bazley, E. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3(2), 105-116. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9)
- Doutres, O., Salissou, Y., Atalla, N., & Panneton, R. (2010). Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. *Applied Acoustics*, 71(6), 506-509. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.01.007>
- European Commission. (2013). *Study on the wood raw material supply and demand for the EU wood-processing Industries (Indufor)* – December 2013 – Part 1. Retrieved from [file:///C:/Users/1680/AppData/Local/Packages/MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/indufor-report-part1_en%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/1680/AppData/Local/Packages/MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/indufor-report-part1_en%20(1).pdf)
- Friás, M., Rodríguez, O., & Sánchez de Rojas, M. I. (2015). Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials. A review. *Construction and Building Materials*, 74, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.007>
- Gayathri, R., Vasanthakumari, R., & Padmanabhan, C. (2013). Sound absorption, thermal and mechanical behavior of polyurethane foam modified with nano silica, nano clay and crumb rubber fillers. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(5), 301-308.
- Goel, G., & Kalamdhad, A. S. (2017). An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing. *Construction and Building Materials*, 148, 334-343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.087>
- Horoshenkov, K. V. (2017). A review of acoustical methods for porous material characterisation. *International Journal of Acoustics and Vibrations*, 22(1), 92-103. <https://doi.org/10.20855/ijav.2017.22.1455>
- Horoshenkov, K. V., & Swift, M. J. (2002). The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(5), 2371-2378. <https://doi.org/10.1121/1.1408312>
- International Organization for Standardization. (1991). *Acoustics – Materials for acoustical applications – Determination of airflow resistance* (ISO 9053:1991).
- Jackson, M. J., Line, M. A., Wilson, S., & Hetherington, S. J. (2000). Application of composted pulp and paper mill sludge to a young pine plantation. *Journal of Environmental Quality*, 29(2), 407-414. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900020006x>
- Kairyte, A. (2017). *Biopoliuretano putų, modifikuotų popieriaus gamybos atliekomis, tyrimai* (Technologijos mokslų daktaro disertacija). Vilniaus Gedimino technikos universitetas. <https://doi.org/10.3846/2017-060-M>
- Miki, Y. (1990). Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models. *Journal of the Acoustical Society of Japan* (E), 11(1), 19-24. <https://doi.org/10.1250/ast.11.19>
- Monte, M. C., Fuente, E., Blanco, A., & Negro, C. (2009). Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*, 29(1), 293-308. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002>
- Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., Wu, Y. F., Hanif, A., & Khan, M. U. A. (2018). Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: An industrial-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1122-1135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.060>
- Ochoa de Alda, J. A. G. (2008). Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(7), 965-972. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.02.005>
- Panneton, R. (2017). Overview of the porous material characterisation methods and impedance tube measurements. *Denorms training school 3 „Experimental techniques for acoustic porous materials and metamaterials*, 4-6 December 2017, Le Mans.
- Panneton, R., & Olny, X. (2006). Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(4). <https://doi.org/10.1121/1.2169923>
- Pfretzschner, J. (2002). *Rubber crumb as granular absorptive acoustic material*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10261/7999>
- Pfretzschner, J., & Rodriguez, R. M. (1999). Acoustic properties of rubber crumbs. *Polymer Testing*, 18(2), 81-92. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(98\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(98)00009-9)
- Pokhrel, D., & Viraraghavan, T. (2004). Treatment of pulp and paper mill wastewater – A review. *Science of the Total Environment*, 333(1-3), 37-58. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.017>

- Priadi, C. W., Rahmatika, D., Moersidik, I., & Setyo, S. (2014). Biogas production in the anaerobic digestion of paper sludge. *APCBEE Procedia*, 9, 65-69. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.01.012>
- Sánchez-Orgaz, E. M., Denia, F. D., Baeza, L., & Kirby, R. (2019). Numerical mode matching for sound propagation in silencers with granular material. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 350, 233-246. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2018.10.030>
- Sarkar, R., Kurar, R., Gupta, A. K., Mudgal, A., & Gupta, V. (2017). Use of paper mill waste for brick making. *Cogent Engineering*, 4(1), 1405768. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1405768>
- Shumway, G. (1960). Sound speed and absorption studies of marine sediments by a resonance method. *Geophysics*, 25(2), 451-467. <https://doi.org/10.1190/1.1438717>
- Sukontasukkul, P. (2009). Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1084-1092. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.021>
- Sutcu, M., & Akkurt, S. (2009). The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramics International*, 35(7), 2625-2631. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.02.027>
- Urick, R. J. (2005). The Absorption of sound in suspensions of irregular particles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 20(3), 283-289. <https://doi.org/10.1121/1.1906373>

PREDICTION AND EVALUATION OF GRANULAR MATERIAL SOUND ABSORPTION

T. Astrauskas, R. Grubliauskas

Summary

Paper sludge is the waste which raise the concern in the most the paper and pulp industry plants. Scientists often search for the new effective, environmentally friendly way to recycle such waste. In the recent past engineering research studies of the new recycled sound absorptive materials became more relevant. Granular media is one of groups which are known as porous materials. Prediction of granular material was done using well known Horoshenkov and Swift model and Champoux-Allard physical model. For predicting sound absorption coefficient experimentally obtained air flow resistivity values was used. In this study three different granular material was chosen: paper sludge, fired clay and rubber crumbs. Experimental data showed that when using same diameter granules, air flow resistivity were different due to the shape of granules. The highest air flow resistivity value obtained using paper sludge (3,3 K Pa s/m²). For that material sound absorption coefficient α with 10 cm thickness sample would reach 0,57 – 0,82.

Keywords: Sound absorption coefficient, granular media, air flow resistivity, paper sludge.