

REGULIUOJAMO MEMBRANINIO GARSO ABSORBERIO SU POPIERIAUS GAMYBOS DUMBLU TYRIMAI IR TAIKYMAS

Tomas Astrauskas¹, Raimondas Grubliauskas²

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerijos fakultetas,
Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra*

El. p. ¹tomas.astrauskas@vilniustech.lt; ²raimondas.grubliauskas@vilniustech.lt

Anotacija. Perdirbamų medžiagų tyrimai paskutiniu metu tampa populiareni. Tokių tyrimų reikalingumą skatina aplinkosauginis požiūris vis griežtesnė Europos Sąjungos ir kitų šalių politika. Perdirbant atliekas uždaromas žiedinės ekonomikos ciklas. Šiame straipsnyje nagrinėjamos popieriaus gamybos dumblo (PGD) kompozitinių plokščių pritaikymo galimybės realiose patalpose siekiant pagerinti patalpų akustinę aplinką. Studijos metu buvo sukurta ir patikrinta garsą sugerianti konstrukcija „Reguliuojamas membraninis garso absorberis“. Ši konstrukcija yra priskiriama prie rezonansinio tipo garso absorberių. Sukurtas absorberis yra išskirtinis tuo, kad kompleksiskai prisideda prie popieriaus gamybos atliekų tvarkymo problematikos ir yra produktas patalpų akustinei aplinkai gerinti. Šiame straipsnyje yra pristatomi reguliuojamo membraninio garso absorberio konstrukciniai ypatumai, jo efektyvumas mažinant reverberacijos trukmę. Taikant skaitinį modeliavimą prognozuojamas absorberių efektyvumas mažinant reverberacijos trukmę patalpoje siekia iki 48 % (absorberiais uždengus 20 % patalpos paviršių). Kalbos perdavimo indeksas padidėja 1,5 karto (absorberiais uždengus 40 % patalpos paviršių). Šio straipsnio tikslas – pasiūlyti galimą popieriaus gamybos dumblo garsą sugeriančių plokščių integraciją į įvairios paskirties patalpas.

Reikšminiai žodžiai: perdirbamos medžiagos, popieriaus gamybos dumblas, garso sugertis, oro tarpas, reverberacijos trukmė.

Įvadas

Popieriaus gamybos sektorius yra vienas iš taršiausių industrinių sektorių. Šis sektorius aprašomas kaip vienas didžiausių energijos ir vandens vartotojų (Pokhrel & Viraraghavan, 2004). Nuotekų tvarkymo procese susidarancio popieriaus gamybos dumblas siekia nuo 0,3 iki 1 m³ dumblo nuo 1 t pagaminto popieriaus (Priadi et al., 2014).

Didžiausia dalis (apie 35 % nuo pagaminamo popieriaus) iš susidaranciu atlieku šioje pramonės šakoje yra popieriaus gamybos dumblas (Frías et al., 2015). 2015 m. Europos Sąjungoje buvo pagaminama 93 mln. t. popieriaus, nors buvo prognozuojama, kad popieriaus gamybos apimtis nesikeis, tačiau įvykus COVID-19 viruso pandemijai popieriaus gamyba susitraukė iki 85,2 mln. t./metus. Nors pakuočių ir namų apyvokoje naudojamo popieriaus kiekiai išaugo apie 1 %, tačiau kitose pramonės šakose naudojamo popieriaus kiekis sumažėjo (Cepi, 2021). Remiantis autoriaus M. Frias kartu su kitais autoriais išleistu straipsniu ES kasmet susidaro 29,8–32,5 mln. t. popieriaus gamybos dumblo.

Popieriaus gamybos dumblo sudėtis ir savybės priklauso nuo gamybos efektyvumo ir žaliavos kokybės. Kadangi dumblas gali būti laikomas lauko sąlygomis, jo drėgmė gali labai kisti.

Popieriaus perdirbimo gamybos atliekų dumblas yra kompleksiškas įvairių medžiagų mišinys. Jį sudaro perdirbto popieriaus plaušas, neorganinės kietosios medžiagos ir cheminiai priedai, kurie buvo naudoti popieriaus gamyboje (Bajpai, 2014). Popieriaus gamybos dumblas gali būti skirstomas į organinį ir neorganinį. Neorganinė dalimi yra laikoma ta dumblo dalis, kurią daugiausia sudaro kalцитas ir talkas, o organinė dalimi laikoma ta popieriaus gamybos dumblo dalis, kuri yra sudaryta iš celiuliozės ir lignino (Wang et al., 2016).

Garso kokybę patalpoje lemia du pagrindiniai patalpų akustikoje nagrinėjami parametrai – reverberacijos trukmė (*RT*) ir kalbos perdavimo indeksas (*STI*). Reverberacija, kaip fizikinis reiškinys, yra garso bangų pasikartojimas dėl nevisiškos garso sugerties patalpoje. Bangų pasikartojimu vadinamas reiškinys, kai banga atsimuša nuo garso nesugeriančių paviršių (sienų, lubų, baldų) (Nowoświat & Olechowska, 2016).

Reverberacijos trukmę lemiantys patalpos parametrai yra medžiagos sugerties plotas, kuris yra matuojamas be-dimensiu dydžiu, Sabinais ir patalpos tūriu.

$$R_{T,60} = 0,161 \cdot \frac{V}{A} = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S}, \quad (s), \quad (1)$$

čia $R_{T,60}$ – 60 dB garso slopimo trukmė (s); A – garso sugerties plotas (Sabinai); α – medžiagos garso sugertis; S – plotas, kuris yra padengtas garsą sugeriačia medžiaga, m^2 ; V – patalpos tūris, m^3 .

Reverberacijos trukmės mažinimas yra tiesiogiai susijęs su patalpoje esančių medžiagų garso sugerties efektyvumu ir padengimo plotu.

Patalpų akustikoje reverberacijai mažinti ar rezonansams patalpoje naikinti naudojami skirtingų tipų garsą sugeriantys elementai. Pagrindinės garso absorberių rūšys yra membraniniai, Helmholtzo (rezonansiniai) ir porėti absorberiai.

Membraniniais absorberiais vadinamos sistemos, kurios susideda iš plonos medžiagos arba plokštės ir oro tarpo. Galimos variacijos užpildant oro tarpą porėta garsą sugeriačia medžiaga. Tokio tipo absorberiai veikia masės ir spyruoklės bei masės principu. Akustinė banga, turinti sąlygiškai aukštą slėgį, priverčia vibruoti plokštę tam tikrame dažnyje, kurį nusako plokštės masė. Oro tarpas už plokštės laikomas spyruokle tol, kol oro tarpe susidaro stovinčioji banga.

Vibruodama membrana padidina oro dalelių judėjimo greitį tarpe už jos, padidinama trintis tarp oro dalelių ir garsinė energija slopsta. Tokio tipo absorberiai visada veikia sąlygiškai siaurame dažnių diapazone. Didinant plokštės standumą, t. y. didinant masę arba storį, galima išgauti garso sugertį platesniame dažnių diapazone, tačiau visose masės ir spyruoklės bei masės sistemose platinant sugerties diapazoną prarandamas maksimalus absorberio efektyvumas. Tokių absorberių efektyvumas labai priklauso nuo montavimo sąlygų. Membranines plokštes reikėtų montuoti kiek įmanoma lanksčiau. Tokio tipo absorberiai dažniausiai naudojami tam tikro dažnio bangoms sugerti, esant specifiniams garso šaltiniams patalpose arba žemo dažnio stovinčiosioms bangoms naikinti (Cox, D'Antonio, 2009; Sakagami et al., 2019).

Šiuo straipsniu yra pasiūlomas būdas mažinti reverberacijos trukmę patalpoje taikant reguliuojamą porėtą garso absorberį.

Tyrimų metodika ir medžiagos

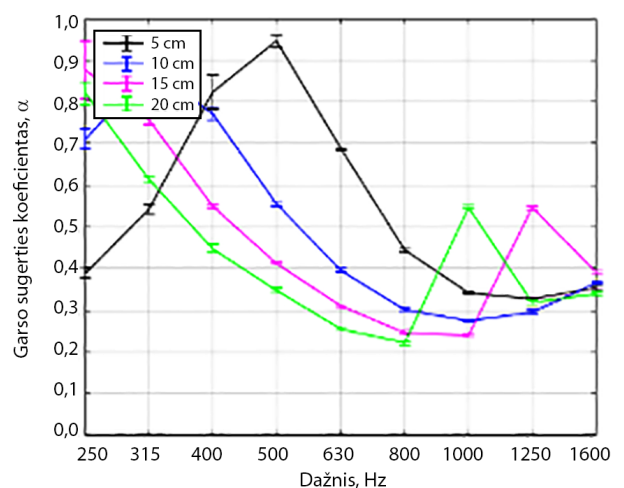
Reguliuojamo porėto garso absorberio veikimo principas paremtas porėtos medžiagos garso sugerties ir sklindančio garso bangų rezonansu (žr. 2 pav.). Garso bangai (1) krentant į konstrukciją, dalis energijos atspindima, dalis

yra sugerama į popieriaus gamybos dumblo kompozitinę plokštę (3), kuri yra įtvirtinta į absorberio korpusą (2). Likusi garso energija pereina per ją, difraguota banga slopsta oro tarpe (5) dėl oro garso sugerties savybių ir atsispindėjusi nuo pastato konstrukcijos (4) bei praradusi dalį garso energijos grįžta per popieriaus gamybos dumblo kompozitinę plokštę (3) atgal į patalpą praradusi didžiąją dalį energijos (Astrauskas ir Grubliauskas, 2022).

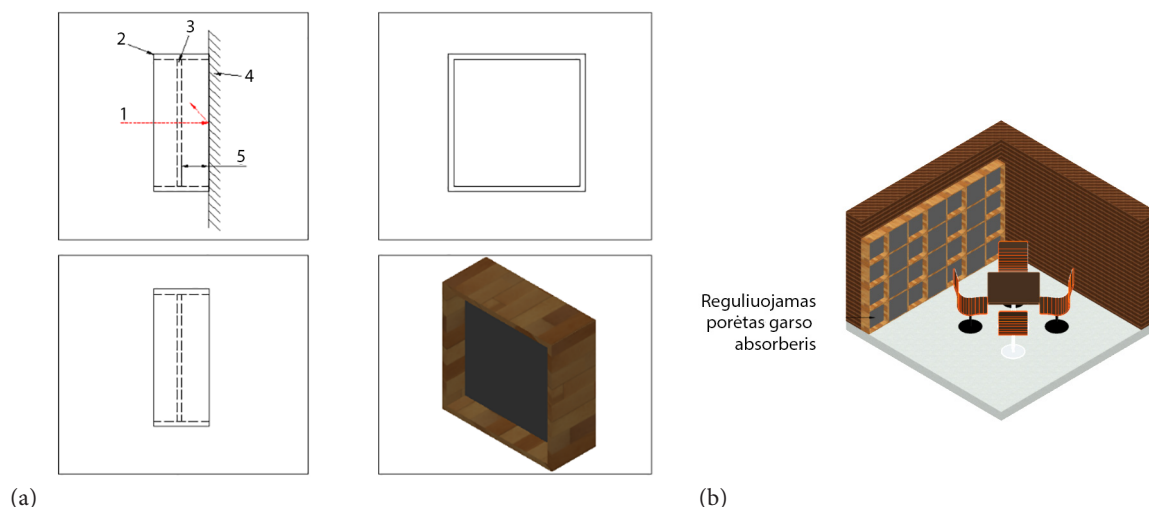
Sukurta konstrukcija siekiama, kad garso absorberis būtų pagamintas iš pakartotinai panaudojamų medžiagų ir būtų paremtas efektyvia garso sugertimi. Konstrukcija turi galimybę būti reguliuojama keičiant oro tarpo dydį, tokiu būdu konstrukcija taptų universalesnė, palyginti su kitomis sukurtais konstrukcijomis. Kaip absorbcinė porėtą medžiagą siūloma naudoti popieriaus gamybos dumblo kompozitus. Kompozitinės plokštės pagamintos popieriaus gamybos dumblo (PGD) pagrindu, kuris šiuo metu yra klasifikuojamas kaip atlieka, netinkama pakartotiniam panaudojimui.

Ši konstrukcija išsiskiria nuo kitų panašių konstrukcijų tuo, kad: naudojama veikioji garsą sugerianti plokštė, pagaminta iš popieriaus gamybos dumblo kompozito (3), įrenginys turi galimybę būti reguliuojamas, t. y. galima didinti arba mažinti oro tarpą (5) tarp kompozitinės popieriaus gamybos dumblo plokštės (3) ir pastato konstrukcijos (4). Tokiu būdu įrenginio garso sugerties dažniai kinta, nekeičiant absorberio konstrukcijos. Patalpoje naudojant keletą ar keliolika absorberių, galima išgauti efektyvią garso sugertį plačiame dažnių diapazone, esant absorberių sistemai (naudojami skirtingi oro tarpo (5) atstumai už absorberių plokščių (3)).

Reverberacijos trukmei modeliuoti naudojami jau publikuoti reguliuojamo porėto garso absorberio sugerties duomenys (1 pav.) (Astrauskas et al., 2021).



1 paveikslas. Garso sugertis naudojant skirtingus oro tarpus, naudojama plokštė – 2,5–5 mm 70 % PGD (Astrauskas et al., 2021)



2 paveikslas. Reguliuojamas garso absorberis: (a) – reguliuojamo porėto garso absorberio schema; (b) – garso absorberių vizualizacija

Esant sistemai su oro tarpu garso sugerties maksimumas nustatomas dažniuose, kurie atitinka ketvirtadalį bangos ilgio. Garso bangos judėjimas prie standaus sandarinimo (taikymo atveju sienos) yra 0, tuomet esant $\frac{1}{4}$ bangos ilgio pasiekama didžiausia bangos amplitudė, todėl akustinė sistema yra efektyviausia esant atitinkamam storiui (Asdrubali et al., 2008). Akustikų bendruomenėje šis fizikinis reiškinys yra vadinamas $1/4$ bangos ilgio taisykle. Tiriamąją akustinę sistemą sudaro porėta terpė (PGD kompozitinė plokštė ir oro tarpas). Tokia akustinė sistema veikia kaip membraninis absorberis. Tokio tipo absorberio mechaninė garso energija verčiama ne tik į šilumą, bet ir į mechaninę vibracijos energiją (vibruoja PGD plokštė), kuri tuo pat metu didina oro dalelių trintį oro tarpe. Visos akustinės sistemos bendras ilgis šiuo atveju yra plokštės storis su oro tarpu.

Reverberacijos trukmės modeliavimas patalpoje, kurioje naudojami reguliuojami porėti garso absorberiai. Patalpų akustikai modeliuoti naudojama *Odeon* modeliavimo programa. Programa paremta spindulių (vektorių) sekimo ir garso slopimo algoritmais.

Naudojantis programa sprendžiama garso sklaidos patalpoje problematika dėl patalpos geometrijos įvertinant skirtingų paviršių garso sugertis. Projektuojant patalpas tai vienas svarbiausių uždavinių siekiant sukurti geros garso kokybės patalpas.

Šiame modelyje yra padarytos prielaidos:

- difrakcijos efektas yra nevertinamas;
- visi atspindintys paviršiai yra idealiai lygūs.

Modelyje skaičiuojama garso banga slopsta judėdama ore ir atsispindėdama nuo kiekvieno paviršiaus (dėl paviršiaus garso sugerties).

Jeigu modelyje nurodytoje priėmėjo vietoje (*receiver point*) nepateks nei viena banga, tuomet skaičiavimai

rodys, kad toje vietoje iš viso nėra akustinės energijos. Taip yra todėl, kad modelis nevertina bangų sklaidymosi efekto.

Dažniausiai iki šiol naudojamas *Sabine* reverberacijos modelis buvo aptartas pirmajame skyriuje. *Eyring* reverberacijos modelis nuo *Sabine* modelio skiriasi garšą sugeriančių paviršių garso sugerties ploto skaičiavimu. *Eyring* formulėje taip pat nevertinama oro garso sugertis, tai gali būti aktualu didelėse patalpose. Tačiau *Odeon* modelyje yra įvesta papildoma pataisa dėl atmosferinės garso sugerties. Tai reiškia, kad modelyje yra atsižvelgiama į tai, kad garsas sklisdamas ore taip pat praranda energiją. Tokiu atveju reverberacijos trukmė skaičiuojama pagal 2 formulę:

$$R_{T,60} = 0,163 \frac{V}{(S + 4\alpha_{oro} V)}, \quad (2)$$

čia $R_{T,60}$ – 60 dB garso slopimo trukmė (s); S – garso sugerties plotas (Sabina); α_{oro} – oro garso sugertis; V – patalpos tūris, m^3 .

Modeliavimo įvesties pagrindiniai parametrai pateikti 1 ir 2 lentelėse. Pagrindiniai garso sklaidos patalpoje modeliavimo parametrai yra garso greitis, oro tankis, patalpos tūris, garso šaltinio ir mikrofono pozicijos, iš šaltinio paleidžiamų bangų skaičius.

1 lentelė. Patalpos ir akustinių sąlygų parametrai, įvedami į modelį

Parametras	Reikšmė
Garso greitis, c_0	343 m/s
Oro tankis, ρ_0	1,2 kg/m ³ (20 °C)
Spindulių skaičius	400 vnt. (kryptinis – pusiau sferinis)
Patalpos tūris, V	189,75 m ³

2 lentelė. Modelio įvesties garso sugerties duomenys

Elementas	1/3 oktavos dažnių juosta, Hz		
	250	500	1000
Sienos, lubos, grindys	0,07	0,05	0,04
PGD absorberis 5 cm oro tarpas	0,39	0,94	0,45
PGD absorberis 10 cm oro tarpas	0,71	0,55	0,28
PGD absorberis 15 cm oro tarpas	0,88	0,41	0,24
PGD absorberis 20 cm oro tarpas	0,82	0,35	0,54

Vertinant patalpų garso kokybę yra naudojamas kalbos perdavimo indeksas (*STI*). Šiuo rodikliu objektyviai vertinama garso kokybė, garsinės informacijos aiškumas patalpoje. Šiame darbe *Odeon* modeliavimo programa nustatomas kalbos perdavimo indekso pokytis patalpoje su porėtai popieriaus gamybos dumblo absorberiais.

Medžiagų garso sugertis yra parenkama iš programos katalogo (mūro sienos) ir iš eksperimentinių tyrimų rezultatų (PGD plokščių garso sugertis).

Atliekant eksperimentinius tyrimus buvo nustatyta PGD absorberių garso sugertis 250–1600 Hz dažnių diapazone. Todėl atliekant modeliavimą reverberacijos trukmės sumažėjimas modeliuojant buvo tiriamas trijose oktavos dažnių juostose (250; 500; 1000 Hz).

Atliekant modeliavimą yra išsikelta užduotis nustatyti sukurtų garso absorberių efektyvumą patalpoje. Efektyvumas vertinamas reverberacijos trukmės parametro sumažėjimu ir kalbos perdavimo indekso padidėjimu. Siekiant nustatyti absorberių efektyvumą pirmiausia modeliuojama patalpa, kurioje nėra absorberių, vien tik garsą atspindintys paviršiai. Esant 20 %; 40 %; 60 %; 80 % ir 100 % patalpos paviršių padengimui naudojami absorberiai su skirtingais (5; 10; 15; 20 cm) oro tarpais. Taip pat ištirtas reverberacijos trukmės sumažėjimas naudojant absorberius patalpoje su skirtingais oro tarpais, juos išdėstant šachmatine tvarka.

Pasirinkta patalpa yra stačiakampio gretasienio formos, kuri yra 11,5 m ilgio, 5,5 m pločio ir 3 m aukščio.

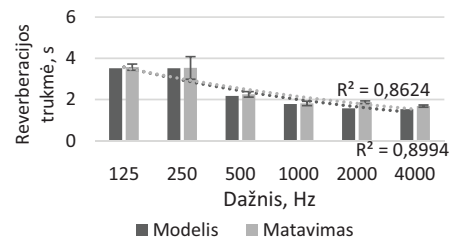
Modelyje absorberiai yra montuojami ant visų sienų. Pagrindinis šio modeliavimo uždavinys – ištirti popieriaus gamybos dumblo absorberių efektyvumą keičiant oro tarpą absorberijoje ir sienos padengimo plotą absorberiais. Modelio rezultatai yra aidėjimo trukmė (R_{T60}) ir kalbos perdavimo indeksas (*STI*).

Rezultatai ir jų analizė

Siekiant patikrinti sukurtų porėtų garso absorberių efektyvumą mažinant reverberacijos trukmę buvo atliktas patalpos modeliavimas. Gauti rezultatai pateikiami kaip

reverberacijos trukmė R_{T60} 1/3 oktavos juostose bei Kalbos perdavimo indeksas (*STI*).

Siekiant įvertinti modelio tinkamumą, visų pirma, prieš atliekant PGD absorberių įtakos reverberacijos trukmei modeliavimą, buvo atliktas reverberacijos modelio patikrinimas. Modeliavimo rezultatai buvo palyginti su eksperimentiniais rezultatais realioje patalpoje. Įsitikinus, kad modelis yra tinkamas, į modelį buvo įvedami PGD absorberių garso sugerties parametrai.

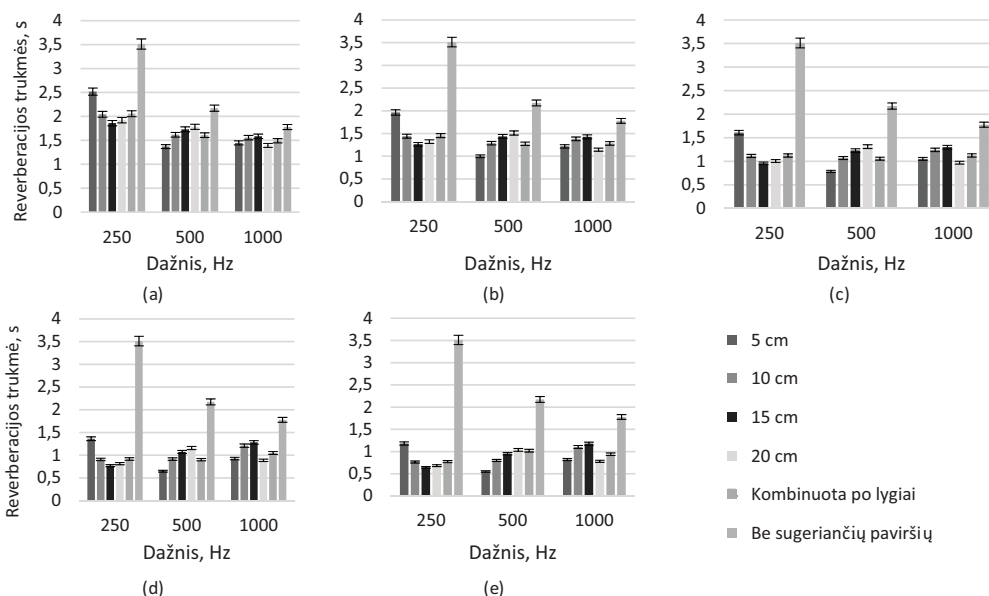


3 paveikslas. Reverberacijos trukmės modelio patikrinimas

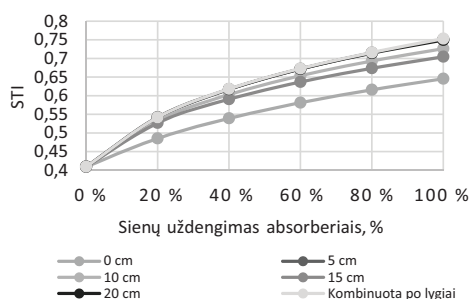
3 paveiksle pateikiamos tos pačios patalpos išmatuota ir sumodeliuota reverberacijos trukmės. Sumodeliuota reverberacijos trukmė skiriasi nuo išmatuotos standartinės matavimo paklaidos ribose. Standartinis nuokrypis tarp matavimo ir modeliavimo skirtingose oktavos dažnių juostose kito nuo 0,14 iki 0,21. Skirtumas matavimo ir modeliavimo rezultatų 125–500 Hz oktavos dažnių juostose siekė 3 %, o aukštesnėse oktavos dažnių juostose (2000–4000 Hz) skirtumas siekė 16 %. Kadangi PGD garsą sugeriančių plokščių garso sugertis yra žinoma tik 250–1000 Hz oktavos dažnių juostose, todėl didesnis modelio netikslumas netrukdo tiksliai modeliuoti patalpos garso sugertį. Laikoma, kad modeliavimo paklaida yra 3 % (didžiausias nustatytas nuokrypis nuo eksperimentinių rezultatų 250–1000 Hz oktavos dažnių juostų diapazone).

4 paveiksle pateikiamos patalpos reverberacijos trukmės modeliavimo vertės keičiant absorberio oro tarpą ir sienų padengimo plotą absorberiais. Straipsnyje siūlomas garso absorberis yra sieninis, todėl padengimas keičiamas nuo 20 iki 100 % sienų ploto, grindys ir lubos yra nedengiamos. Iš grafikų matyti, kad sukurta sistema geriausiai veikia, kai naudojami absorberiai su skirtingais oro tarpais ir juos kombinuojant. Kombinuojant absorberius išgaunamas reverberacijos trukmės mažinimas platesniame oktavos dažnių juostų spektre. Remiantis 4 paveiksle pateiktais rezultatais galima teigti, kad norint išgauti plačiajuostę reverberacijos trukmės mažinimą patalpoje reikia naudoti absorberius su skirtingais oro tarpais. Jeigu reiktų mažinti tam tikros oktavos dažnių juostos garsą, rekomenduojama naudoti absorberius su specialiai tai oktavos dažnių juostai parinktu oro tarpu.

Įdiegus PGD absorberių sistemą kalbos suprantamumas padidėja naudojant absorberius ant 20 % sienų ploto



4 paveikslas. Reverberacijos trukmė patalpoje naudojant sukurtas konstrukcijas: (a) – 20 % sienų paviršiaus padengimas absorberiais; (b) – 40 %; (c) – 60 %; (d) – 80 %; (e) – 100 %



5 paveikslas. Kalbos perdavimo indeksas kitimas didinant absorberių kiekį patalpoje

(5 pav.). Palyginti su atveju nenaudojant absorberių, *STI* rodiklis padidėja nuo 18,6 iki 32,1 %. Priklausomai nuo absorberio oro tarpo ir sugerties ploto *STI* rodiklis padidinamas nuo 18,6 iki 93,8 %. Pagal standartą IEC 60268-16:2020 toks kalbos suprantamumo indeksas vertinamas kaip vidutinis ($STI = 0,45-0,6$) arba geras ($STI = 0,6-0,75$), naudojant kombinuotą absorberių variantą pasiekama riba iki puikaus ($STI > 0,75$) (Electrotechnical, 2021).

Atlikus reverberacijos trukmės ir kalbos perdavimo rodiklio rezultatų analizę buvo nustatyta, kad oro tarpas tarp garsą sugeriančios plokštės ir nesugeriančio standaus paviršiaus padidina absorberio efektyvumą iki 80,9 % vertinant pagal reverberacijos trukmės parametą, 93,8 % – pagal *STI* parametą. Taip yra todėl, kad esant oro tarpui už garsą sugeriančios plokštės absorberio garso sugertis padidėja žemesniuose dažniuose, taigi geriau sugeriami žemesnių oktavos dažnių garsai, kurių reverberacijos trukmė paprastai būna didesnė, palyginti su aukštesnių dažnių juostomis.

Išvados

Atlikus patalpos reverberacijos trukmės skaitinį modeliavimą, kai buvo naudojami reguliuojami porėti garso absorberiai, buvo nustatyta, kad:

1. Norint išgauti plačiau juostą reverberacijos trukmės mažinimą reikia naudoti skirtingos konfigūracijos absorberius. Patalpų akustikos modeliavimo metu buvo nustatyta, kad, uždengus 20 % patalpos paviršių skirtingo oro tarpo absorberiais, reverberacijos trukmę galima sumažinti iki 48 %.
2. Reverberacijos trukmė patalpoje tiesiogiai susijusi su medžiagų geba sugerti garsą, todėl reverberacijos trukmė priklauso nuo absorberio garso sugerties tam tikroje oktavos dažnių juostoje. Garso absorberiais padengus 60 % patalpos paviršių buvo nustatyta, kad pasiekiamas geras kalbos supratimo lygis ($STI = 0,67$).

Literatūra

- Astrauskas, T., & Grubliauskas, R. (2022). *Reguliuojamas porėtas garso absorberis* (Patent No. 2020 017). Lietuvos patentų biuras.
- Astrauskas, T., Januševičius, T., & Grubliauskas, R. (2021). Acoustic panels made of paper sludge and clay composites. *Sustainability*, 13(2), 637. <https://doi.org/10.3390/su13020637>
- Bajpai, P. (2014). 14 – Water Reuse, Wastewater Treatment and Closed-Cycle Operation. In P. B. T.-R. and D. of R. P. Bajpai (Ed.). *Recycling and Deinking of Recovered Paper* (pp. 251–269). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416998-2.00014-3>
- Cepi. (2021). *Key Statistics 2020*. <https://www.cepi.org/key-statistics-2020/>

- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2021). *Garso sistemy įranga. 16 dalis. Objektvūs kalbos aiškumo įvertinimas pagal kalbos perdavimo indeksą* (IEC 60268-16:2020).
- Frias, 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>
- Nowoświat, A., & Olechowska, M. (2016). Fast estimation of speech transmission index using the reverberation time. *Applied Acoustics*, 102, 55–61.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.09.001>
- Pokhrel, D., & Viraraghavan, T. (2004b). 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>
- Wang, S., Chen, M., Lu, L., Zhao, P., & Gong, C. (2016). Investigation of the adaptability of paper sludge with wood fiber in cement-based insulation mortar. *BioResources*, 11(4), 10419–10432.
<https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10419-10432>

ADJUSTABLE MEMBRANE SOUND ABSORBER WITH PAPER SLUDGE PANELS

T. Astrauskas, R. Grubliauskas

Summary

Research on recyclable materials has recently become more popular. The need for such research is driven by the increasingly strict environmental policies of the European Union and other countries. Recycling of the materials closes the circular economy cycle. This paper examines the applicability of paper sludge composite panels in rooms with the aim of improving the acoustic environment. During the study, the sound-absorbing construction “Adjustable Membrane Sound Absorber” was developed and tested. The design of the absorber is a resonant type. The developed absorber is unique in that it contributes comprehensively to the problems of waste management in paper production industry and it is a product for the improvement of the indoor acoustic environment. This article presents the design features of the adjustable membrane sound absorber, its efficiency in reducing the reverberation time. Using the numerical modelling, the efficiency of absorbers in reducing the reverberation time in the room predicted to be up to 48% (with absorbers covering 20% of the room surface). The speech transmission index (STI) increases 1.5 times (with absorbers covering 40% of the surface of the room). The aim of this paper is to propose the possible integration of sound-absorbing panels made of paper sludge into different purpose rooms.

Keywords: recycled materials, paper sludge, sound absorption, air gap, reverberation time.