

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas ASTRAUSKAS

KOMPOZITINIŲ PLOKŠČIŲ IŠ POPIERIAUS
GAMYBOS DUMBLO AKUSTINIŲ SAVYBIŲ
TYRIMAI IR GARSO ABSORBERIO
KŪRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
APLINKOS INŽINERIJA (T 004)

Vilnius, 2022

Disertacija rengta 2017–2022 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Raimondas GRUBLIAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, aplinkos inžinerija – T 004).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Saulius VASAREVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, aplinkos inžinerija – T 004).

Nariai:

dr. Steigvilė BYČENKIENĖ (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fizika – N 002),

dr. Ivan HERRERO-DURA (KFB Acoustics, Lenkija, matematika – N 001),

doc. dr. Eglė JOTAUTIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, aplinkos inžinerija – T 004),

dr. Olga KIZINIEVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, aplinkos inžinerija – T 004).

Disertacija bus ginama viešame Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2022 m. gegužės 13 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2022 m. balandžio 12 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2022-005-M mokslo literatūros knyga

doi: 10.20334/2022-005-M

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2022

© Tomas Astrauskas, 2022

tomas.astrauskas@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tomas ASTRAUSKAS

THE RESEARCH OF ACOUSTIC
PROPERTIES OF COMPOSITE PANELS
MADE OF PAPER SLUDGE AND
DEVELOPMENT OF SOUND ABSORBER

DOCTORAL DISERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENVIRONMENTAL ENGINEERING (T 004)

Vilnius, 2022

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2017–2022.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Raimondas GRUBLIAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Environmental Engineering – T 004).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Environmental Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman:

Prof. Dr Saulius VASAREVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Environmental Engineering – T 004).

Members:

Dr Steigvilė BYČENKIENĖ (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physics – N 002),

Dr Ivan HERRERO-DURA (KFB Acoustics, Poland, Mathematics – N 001),

Assoc. Prof. Dr. Eglė JOTAUTIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Environmental Engineering – T 004),

Dr Olga KIZINIEVIČ (Vilnius Gediminas Technical University, Environmental Engineering – T 004).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Environmental Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 13 of May 2022.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 12 April 2022.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at Vilnius Gediminas Technical University repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos kompozitinės akustinės garsą sugeriančios plokštės, pagamintos popieriaus gamybos dumblo pagrindu. Pagrindinis tyrimo objektas – popieriaus gamybos dumblo kompozitinės plokštės. Disertacijos tikslas – sukurti garsą sugeriančią plokštę ir elementą, skirtą aidėjimo trukmei patalpoje mažinti, panaudojant popieriaus gamybos dumblą. Darbe sprendžiami keli uždaviniai: pirmasis, antrasis ir trečiasis yra susiję su eksperimentinių tyrimų matavimų įranga, suprojektuoti ir pagaminti statinės orinės varžos ir medžiagų garso sugerties matavimo standai, pagamintais įrenginiais atlikti atitinkamų parametrų tyrimai bei analizė. Ketvirtasis susijęs su šių parametrų teoriniu prognozavimu bei patikrinimu, kaip galima pritaikyti patalpose. Šiuo uždaviniu buvo numatyta atlikti popieriaus gamybos dumblo garso sugerties (α) teorinius tyrimus bei modeliavimą, Odeon programa įvertinant popieriaus gamybos dumblo taikymą aidėjimui mažinti.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, pristatomas darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, nurodomas darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė ir ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema paskelbtos autoriaus publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikta popieriaus gamybos dumblo panaudojimo ir garso sklaidos mokslinių tyrimų analizė. Antrajame skyriuje pateiktos mėginių paruošimo ir granuliometrinės analizės, popieriaus gamybos dumblo statinės orinės varžos nustatymo, akustinių ir neakustinių medžiagos parametrų nustatymo, garso sugerties priklausomybės nuo akustinės sistemos parametrų teorinio tyrimo ir reverberacijos trukmės modeliavimo metodikos. Trečiajame skyriuje pateikti tyrimų rezultatai ir jų analizė skirta popieriaus gamybos dumblo kompozitinių plokščių akustiniam charakterizavimui bei garsą sugeriančio elemento kūrimui.

Disertacijos tema paskelbti septyni moksliniai straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* sąrašą, du – recenzuojamuose mokslo žurnaluose, referuojamuose kitose duomenų bazėse, ir du – konferencijų pranešimų leidiniuose. Gautas vienas Lietuvos Respublikos patentas.

Disertacijos tema perskaityti 7 pranešimai konferencijose Lietuvoje ir kitose šalyse.

Abstract

The dissertation investigates composite acoustic sound-absorbing panels based on paper sludge (PS), which are the main research object. The goal of the dissertation is to develop an acoustically effective sound-absorbing panel and the sound absorber using paper sludge. This work addresses several tasks: the first three are related to experimental research measurement equipment. It was developed for static air flow resistivity and material sound absorption measurement and used to research and analyse relevant material parameters. The fourth task is related to the theoretical prediction of these parameters and the verification of applicability.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions and references and lists of the author's publications on the dissertation topic.

The introductory chapter discusses the research problem, presents the relevance of the study, describes the research object, formulates the aim and objectives of the work, describes the research methodology, indicates the scientific novelty of the work, its practical significance and the defended statements. The introduction is closed by presenting the author's publications on the dissertation topic and the structure of the dissertation.

The first chapter presents the analysis of the research on paper sludge application and sound propagation. The second chapter introduces the methods of sample preparation and granulometric analysis, determination of static air flow resistivity of paper sludge, determination of acoustic and non-acoustic material parameters, theoretical study of sound absorption as a function of acoustic system parameters and reverberation time modelling. The third chapter describe the research results and the analysis of the acoustic characterisation of the paper sludge composite panels, as well as the development of a sound-absorbing element.

Seven scientific articles have been published on the dissertation topic: three in scientific journals included in the Clarivate Analytics Web of Science list, two in peer-reviewed scientific journals referenced in other databases and two in conference proceedings. One patent of the Republic of Lithuania was obtained.

Seven conference presentations were made on the dissertation topic at conferences in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Simboliai

A_T – garso sugerties plotas, m^2

$D\%$ – laboratorinių matavimų rezultatų procentinis skirtumas, %

E_n – statistinio rezultatų palyginimo rodiklis

f – garso bangos dažnis, Hz

f_n – prasijotų dalelių masė procentais, %

H_I – krintančiosios bangos perdavimo funkcija

H_R – atspindėjusiosios bangos perdavimo funkcija

K – dinaminis modulis, Pa

k_0 – bangos numeris, m^{-1}

m – galios slopinimo koeficientas

p – slėgis, Pa

R – garso atspindžio koeficientas

R_T – reverberacijos trukmė, s

R_{T60} – reverberacijos trukmė, per kurią garsas nuslopsta 60 dB, s

Z – akustinė varža, Pa

Z_C – būdingoji medžiagos akustinė varža, $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$

Z_S – specifinė medžiagos akustinė varža, $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$

α – garso sugerties koeficientas
 α_{∞} – lenktumas (*angl. tortuosity*)
 $\alpha_{atm.}$ – oro garso sugerties koeficientas
 $\alpha_{vid.}$ – vidutinis garso sugerties koeficientas
 α_w – svertinis garso sugerties koeficientas
 η – dinaminis oro klampis, N s/m²
 Λ – būdingasis klampės ilgis, m
 σ – statinė orinė varža, Pa·s/m²
 ϕ – poringumas, %

Santrumpos

PGD – popieriaus gamybos dumblas

STI – kalbos perdavimo indeksas (*angl. Speech transmission index*)

Apibrėžtys

Akustinė sistema – tai medžiaga ar konstrukcija, kuri yra veikiamą garso bangų.

Akustinė varža – fizikinis parametras, būdingas porėtoms medžiagoms, jis kiekybiškai įvertina medžiagos gebėjimą priešintis garso bangų sukeliama slėgiui.

Akustinis simetriškumas – akustinės sistemos savybė turėti panašias ar tokias pat savybes aplink nurodytą geometrinę ašį.

Bangos numeris – bangos ciklų kiekis per atstumo vienetą, m⁻¹.

Garso absorberis – patalpų akustikos konstrukcinis elementas, skirtas garsui sugerti.

Garso sugertis – santykinė medžiagos geba paversti mechaninę garso energiją į šiluminę energiją.

Granulimetrinė sudėtis – biriųjų ar silpnai susicementavusių uolienu (grunto), dirvožemio stambumo rodiklis.

Nepavojingos atliekos – atliekos, kurios yra nepriskiriamos pavojingoms atliekoms.

Orinė varža – fizikinis parametras, būdingas porėtoms medžiagoms, jis kiekybiškai įvertina medžiagos gebėjimą priešintis oro dalelių judėjimui medžiagos viduje.

Pavojingos atliekos – atliekos, kurios yra nuodingos, degios, sprogstančios, ir kitos kenksmingos medžiagos, kurios gali padaryti žalos žmogaus ir (ar) gyvūnų sveikatai, ir aplinkai.

Popieriaus gamybos dumblas – atlieka, susidaranti popieriaus gamybos pramonėje, valant gamybines nuotekas.

Porėtos medžiagos – tai medžiagos, turinčios porų (tuštumų, kanalų, tarpų).

Porėtos elastinės medžiagos – porėtos medžiagos, kurių kietoji dalis yra elastinga, o fluido dalis yra klampi.

Reverberacijos trukmė – laiko tarpas, per kurį, nutraukus garso spinduliavimą, garso slėgio lygis sumažėja 60 dB.

Vienalytė (arba homogeniška) medžiaga – medžiaga, kurios savybės visose jos dalelėse yra vienodos.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	5
Padėka	5
 1. POPIERIAUS GAMYBOS DUMBLO PANAUDOJIMO IR GARSO SKLAIDOS MOKSLINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ	 7
1.1. Popieriaus gamybos dumblo atliekos ir jų susidarymas	7
1.2. Popieriaus gamybos dumblo sudėtis	10
1.3. Popieriaus gamybos dumblo naudojimas statybos sektoriuje	12
1.4. Garso sklaidos patalpose analizė ir vertinimas	14
1.5. Pasyviųjų garsą sugeriančių elementų tipai	17
1.6. Medžiagų akustinių savybių sietis su neakustinėmis savybėmis	19

1.7. Medžiagų akustinių savybių nustatymo tyrimai ir metodai	26
1.8. Patalpų akustikos modeliavimo programų apžvalga	30
1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir uždavinių formulavimas	32
2. POPIERIAUS GAMYBOS DUMBLO AKUSTINIŲ IR NEAKUSTINIŲ SAVYBIŲ CHARAKTERIZAVIMO IR REVERBERACIJOS TRUKMĖS SKAITINIO MODELIAVIMO METODIKOS	35
2.1. Mėginių paruošimo ir granulimetrinės analizės metodika	36
2.2. Popieriaus gamybos dumblo statinės orinės varžos nustatymas	39
2.3. Garso sugerties priklausomybės nuo akustinės sistemos parametrų teorinio tyrimo metodika	41
2.4. Medžiagos normalės bangos kritimo garso sugerties nustatymo metodika	43
2.5. Reverberacijos trukmės skaitinio modeliavimo patalpoje metodika	48
2.6. Antrojo skyriaus išvados	50
3. POPIERIAUS GAMYBOS DUMBLO AKUSTINIŲ IR NEAKUSTINIŲ SAVYBIŲ CHARAKTERIZAVIMO IR REVERBERACIJOS TRUKMĖS SKAITINIO MODELIAVIMO REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ	53
3.1. Popieriaus gamybos dumblo statinės orinės varžos nustatymo eksperimentinių tyrimų rezultatai	54
3.2. Garso sugerties priklausomybės nuo akustinės sistemos parametrų teorinio tyrimo rezultatai	57
3.3. Medžiagos garso sugerties nustatymo rezultatai	62
3.4. Reverberacijos trukmės modeliavimo rezultatai	78
3.5. Reguluojamas porėtas garso absorberis	82
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	85
BENDROSIOS IŠVADOS	87
REKOMENDACIJA.....	89
LITERATŪROS SĄRAŠAS	91
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .	103
SUMMARY IN ENGLISH.....	105
PRIEDAI¹	119
A priedas. Popieriaus gamybos dumblo kompozitų teorinio garso sugerties tyrimo verifikavimo rezultatai.....	121
B priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija	129
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	131

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	2
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	3
Practical significance of the research findings	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	4
The structure of the dissertation	5
Acknowledgements	5
 1. THE ANALYSIS OF THE RESEARCH ON PAPER SLUDGE USAGE AND SOUND PROPAGATION.....	 7
1.1. The waste of paper sludge and its generation.....	7
1.2. Composition of the paper sludge.....	10
1.3. The usage of the paper sludge in the construction sector	12
1.4. The analysis and evaluation of sound propagation.....	14
1.5. Types of passive sound absorbers.....	17
1.6. Link between acoustic and non-acoustic properties of the materials	19
1.7. The methods and the research on acoustic material properties characterisation	 26
1.8. Review of the room acoustics modelling software.....	30
1.9. Conclusions of the first chapter and formulation of the thesis tasks	32

2. METHODS OF ACOUSTIC AND NON ACOUSTIC PROPERTIES CHARACTERISATION OF PAPER SLUDGE AND METHOD FOR NUMERICAL MODELLING OF REVERBERATION TIME	35
2.1. Method of sample preparation and granulometric analysis	36
2.2. Method of determination of the paper sludge static air flow resistivity	39
2.3. The theoretical research method to determine influence of acoustic system parameters on sound absorption	41
2.4. Method to determine normal incidence sound absorption of the material	43
2.5. The method to model the reverberation time of the room	48
2.6. Conclusions of the second chapter	50
3. RESULTS AND ANALYSIS OF ACOUSTIC AND NON ACOUSTIC PROPERTIES CHARACTERISATION OF PAPER SLUDGE AND METHOD FOR NUMERICAL MODELLING OF REVERBERATION TIME	53
3.1. The results of determination of the paper sludge static air flow resistivity	54
3.2. The theoretical research results of influence of acoustic system parameters on sound absorption	57
3.3. The results of normal incidence sound absorption of the material	62
3.4. Results of reverberation time modelling	78
3.5. Adjustable porous sound absorber	82
3.6. Conclusions of the third chapter	85
GENERAL CONCLUSIONS	87
RECOMENDATION	89
REFERENCES	91
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	103
SUMMARY IN ENGLISH	105
ANNEXES ²	119
Annex A. Verification of the theoretical sound absorption model results of paper sludge composite panels	121
Annex B. The author's declaration of academic integrity	129
Annex C. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation	131

² The annexes are supplied with enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Popieriaus gamybos dumblas (PGD) dėl didelių susidarymo kiekių yra atliekų tvarkymo problema popieriaus gamybos įmonėse. Šiai atliekai tvarkyti skiriama vis daugiau dėmesio, mokslininkai ieško būdų, kaip efektyviau galima ją panaudoti ar perdirbti.

Augant ekonomikai ir didėjant vartojimui, nuolat kyla atliekų tvarkymo problema. Gaminant popierių, kurio suvartojimas yra didžiulis, susidaro šalutinis produktas – popieriaus gamybos dumblas, kuris šiuo metu yra laikomas atlieka, ir toliau keliauja į sąvartynus arba atliekų deginimo jėgaines. Europos Sąjungoje kasmet susidaro 32,5 mln. t popieriaus gamybos dumblo, iš jų 20 % patenka į sąvartynus.

Darbe sprendžiama patalpų aidėjimo problematika panaudojant popieriaus gamybos dumblą, tuo pat metu sprendžiant šių atliekų pakartotinio panaudojimo ir dumblo kaupimosi problematiką. Šiame darbe yra pasiūlomas būdas perdirbti popieriaus gamybos dumblą, sukuriant garso absorberį, kuris prisidės prie žiedinės ekonomikos principų užtikrinimo.

Į reverberacijos trukmės parametą ypač kreipia dėmesį koncertų, kino salių, stočių laukimo salių ir namų garso sistemų projektuotojai. Kuo didesnė reverberacijos trukmė, tuo prastesnė akustinė aplinka, todėl prastėja signalo

(kalbinio pranešimo) perdavimas ir supratimas. Reverberacijos trukmė kaip reiškinys labiau nagrinėjama didelėse patalpose, salėse, bažnyčiose, arenose, tačiau gali būti nagrinėjama ir mažose patalpose. Padidinus garso sugertį patalpoje yra pagerinama akustinė aplinka joje.

Darbo aktualumas

Triukšmo (nepageidaujamų garsų) mažinimas ir patalpų garso kokybės gerinimas dažniausiai yra susijęs su garsą sugeriančiomis medžiagomis. Garsą sugeriančių medžiagų kūrimas yra viena iš gana plačiai nagrinėjamų akustikos mokslo sričių. Garsą sugeriančių medžiagų kūrimas iš natūralių arba pakartotinai panaudotų žaliavų tampa vis aktualesnis. Tokių medžiagų kūrimu užsiima Kanados (R. Panneton), Ispanijos (J. Alba), Čilės (J. P. Arenas), Anglijos (K. V. Horoshenkov) ir kitų šalių mokslininkai. Nuolat ieškoma naujų, efektyvesnių priemonių triukšmui mažinti ir garso kokybei patalpose gerinti. Šiuo metu Lietuvoje mažai kreipiamas dėmesys į patalpų garso kokybę. Patalpos aidėjimo trukmė yra pagrindinis parametras, nusakantis garsinę kokybę patalpoje. Šis patalpos parametras yra lemiantis perduodant kalbinį signalą. Pakankama reverberacijos trukmė yra svarbi koncertų, kino ir įvairiose laukimo salėse, kur pranešama informacija. Aidėjimo trukmės parametras yra tiesiogiai susijęs su garsą sugeriančių medžiagų geba sugerti garsą ir jo plotu patalpoje.

„Naujajame žiedinės ekonomikos veiksmų plane, kuriuo siekiama švaresnės ir konkurencingesnės Europos“ 2020 m. yra nurodoma vengti atliekų susidarymo arba jau susidariusias atliekas naudoti kaip išteklius (European Union, 2021). Todėl turėtų būti atkreiptas dėmesys į pakartotinį atliekų perdirbimą, panaudojimą ar utilizavimą. Popieriaus gamyba yra sudėtinga sritis, susidedanti iš daugelio daugiapakopių procesų, kurių metu gaminami įvairūs produktai, o tuo pačiu metu susidaro ir nemaži kiekiai įvairių atliekų – perdirbto popieriaus atliekų, rašalo šalinimo (*de-inking*) atliekų, popieriaus dumbblas (*waste water-treatment sludge*).

Šiuo darbu siekiama sukurti naują, popieriaus gamybos dumblo pagrindu pagamintą garsą sugeriančią plokštę, kuri būtų integruota į garsą sugeriantį elementą, skirtą patalpų akustikos problemoms spręsti.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – popieriaus gamybos dumblo kompozitinės plokštės ir garso absorberis.

Darbo tikslas

Atsižvelgiant į teorinių, eksperimentinių ir skaitinio modeliavimo tyrimų rezultatus sukurti garso absorberį, skirtą aidėjimo trukmei patalpoje mažinti, panaudojant popieriaus gamybos dumblą.

Darbo uždaviniai

1. Suprojektuoti ir pagaminti laboratorinius statinės orinės varžos ir medžiagų garso sugerties matavimo standus.
2. Atlikti popieriaus gamybos dumblo kompozitų orinės varžos (σ) tyrimus, įvertinti birių PGD granulių dydžio ir skirtingų rišiklių kiekio įtaką orinei varžai.
3. Atlikti popieriaus gamybos dumblo garso sugerties (α) teorinius tyrimus keičiant akustinės sistemos parametrus.
4. Charakterizuoti popieriaus gamybos dumblo kompozitinių plokščių garso sugertį (α) įvertinant rišiklių kiekio bei oro tarpo įtaką.
5. Remiantis eksperimentinių ir teorinių tyrimų duomenimis, sukurti reguliuojamą porėtą garso absorberį bei skaitinio modeliavimo būdu įvertinti jų efektyvumą reverberacijos trukmei patalpoje mažinti.

Tyrimų metodika

Darbe taikomas standartinis medžiagų garso sugerties koeficiento (α) nustatymo eksperimentinis laboratorinis metodas interferometru, remiantis ISO 10534-2; pasitelkiami medžiagų orinės varžos (σ) tyrimai remiantis ISO 9053; popieriaus gamybos dumblo granulimetrinės sudėties nustatymas sijosimo metodu. Eksperimentiniams tyrimams prognozuoti taikomas teorinis ir fizikinis Delany, Bazley ir Miki modelis, taip pat skaitinis reverberacijos trukmės (R_T) ir kalbos perdavimo indekso (STI) modeliavimas *Odeon* programine įranga.

Darbo mokslinis naujumas

Sukurtos popieriaus gamybos dumblo garsą sugeriančios kompozitinės plokštės, kuriose popieriaus gamybos dumblas yra pagrindinė medžiaga, charakterizuota tokių plokščių orinė varža ir garso sugertis, vertinant popieriaus gamybos dumblo

kiekį, bei sukurtas reguliuojamas porėtas garso absorberis reverberacijos trukmei patalpoje mažinti.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Popieriaus gamybos nuotekų dumblo atliekų panaudojimas kaip pagrindinės žaliavos, gaminant kompozitines plokštes, galėtų prisidėti prie popieriaus gamybos dumblo kaupimosi mažinimo popieriaus gamybos įmonėse.

Tyrimų rezultatai ir sukurtas garso absorberis gali būti naudojami koridorių, laukimo salių, gamybinių patalpų garso kokybei gerinti. Pagal atliktų tyrimų duomenis galima parinkti pastato elemento konstrukciją, kuri yra iš dalies pagaminta iš atliekų (50–90 % popieriaus gamybos dumblo kompozite). Tokiu būdu sumažinamas popieriaus gamybos dumblo kiekis, kuris patenka į sąvartynus, saugomas specialiose aikštelėse ar deginamas energijai atgauti.

Ginamieji teiginiai

1. Didinant popieriaus gamybos dumblo kiekį kompozitinėje garsą sugeriančioje plokštėje nuo 50 % iki 90 %, medžiagos statinė orinė varža sumažėja iki 3,5 karto.
2. Kaip rišiklius naudojant molį ar cementą, optimalus popieriaus gamybos dumblo kiekis garsą sugeriančioje plokštėje yra 70 % pagal masę.
3. 5 cm oro tarpas akustiniam absorberiui su popieriaus gamybos dumblo vidutinį garso sugerties koeficientą ($\alpha_{vid.}$) 250–1600 Hz dažnių diapazone padidina 41 ± 19 %.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 7 moksliniai straipsniai. Trys mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI* sąrašą (Astrauskas, Januševičius & Grubliauskas, 2021; Astrauskas et al., 2021; Astrauskas & Grubliauskas, 2020b); du – recenzuojamuose mokslo žurnaluose, referuojamose kitose duomenų bazėse (Astrauskas & Grubliauskas, 2019, 2021); vienas konferencijos pranešimų leidinyje (Astrauskas & Grubliauskas, 2020a). Gautas Lietuvos Respublikos patentas – „Reguliuojamas porėtas garso absorberis“, patento numeris LT 6879 (Astrauskas & Grubliauskas, 2022).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šešiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijose „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ *Aplinkos apsaugos inžinerija*. 2018–2021 m. Vilniuje.
- Tarptautinėje konferencijoje „*Conference of Environmental and Climate technologies*“. 2020 m. Rygoje (internetu).
- Tarptautinėje konferencijoje „*27th International Congress on Sound and Vibration*“. 2021 m. Prahoje (internetu)

Stazuotasi Valensijos politechnikos universitete, Ispanijoje 2020 m. rugsėjo–lapkričio mėn.

Disertacija buvo pristatyta 2021 m. gegužės 19 d. Valstybinio mokslinių tyrimų instituto, Fizinių ir technologijos mokslų centro seminaro metu.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Darbo apimtis yra 119 puslapiai, neskaitant priedų, tekste pateikta 30 numeruotų formulių, 53 paveikslai ir 16 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 137 literatūros šaltiniai.

Padėka

Daktaro disertacija nėra vieno žmogaus darbas. Visų pirma, noriu padėkoti moksliniam vadovui doc. dr. Raimondui Grubliauskui už suteiktą galimybę ir pasitikėjimą siekti daktaro laipsnio aplinkos inžinerijos srityje bei palaikymą ir pagalbą, rengiant disertaciją. Kartu su doc. dr. Tomu Januševičiumi, rengdami mokslines diskusijas, mane nukreipė teisinga linkme, kad pasiekčiau disertacijos tikslą, už tai jiems esu dėkingas.

Taip pat noriu padėkoti dr. Victor Sanchez-Morcillo ir dr. Ruben Pico-Vila už pagalbą stazuotės metu Valensijos Politechnikos universitete.

Taip pat noriu padėkoti visiems buvusiems ir esamiems kolegoms, kurie padėjo dirbti laboratorijoje, davė įvairių teorinių patarimų ir tapo ne tik darbo kolegomis, bet ir draugais.

Galiausiai noriu padėkoti šeimai, kuri visada mane palaikė doktorantūros studijų metu.

Popieriaus gamybos dumblo panaudojimo ir garso sklaidos mokslinių tyrimų analizė

Skyriuje aptariamos popieriaus gamyboje susidarančio dumblo atliekos, jų panaudojimo galimybės akustiniu požiūriu. Analizuojamos popieriaus gamybos dumblo ir kitų pluoštinių medžiagų akustinės savybės, cheminė sudėtis ir fizikinės bei mechaninės savybės.

Skyriaus tematika paskelbti septyni autoriaus moksliniai straipsniai (Astrauskas, Januševičius, Grubliauskas, 2021; Astrauskas, et al., 2021; Astrauskas, Grubliauskas, 2018, 2019, 2020a, 2020b, 2021).

Gautas Lietuvos Respublikos patentas, patento numeris LT 6879 B (Astrauskas, Grubliauskas, 2022).

1.1. Popieriaus gamybos dumblo atliekos ir jų susidarymas

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).

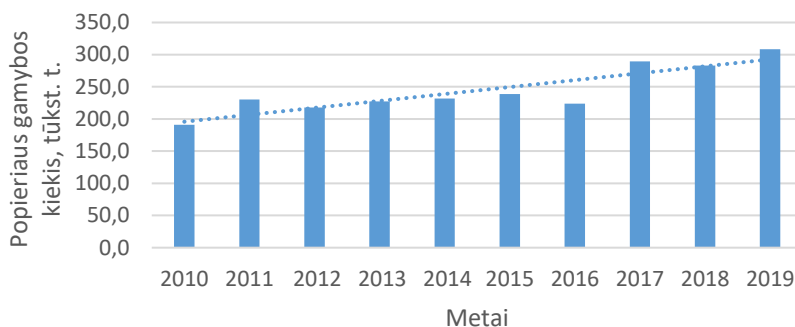


1.1 pav. Popieriaus gamybos dumblo saugojimo aikštelė (autorius nuotrauka)
Fig. 1.1 Paper sludge storage site (author's picture)

Didžiausia dalis (apie 35 % nuo pagaminamo popieriaus) iš susidarantių atliekų šioje pramonės šakoje yra popieriaus gamybos dumblas (1.1 pav.) (Frías et al., 2015). Europos Sąjungoje kas metus pagaminama 93 mln. t. (Europos Komisija, 2016), o prognozuojama, kad popieriaus gamybos apimtis artimiausiu metu nesikeis. Remiantis autoriaus *M. Frías kartu su kitais autoriais* išleistu straipsniu ES kasmet susidaro 32,5 mln. t. popieriaus gamybos dumblo. Lietuvoje nuo 2010 iki 2019 m. pastebimas (1.2 pav.) vidutinis popieriaus gamybos augimas yra apie 4,7 % per metus. Remiantis Lietuvos statistikos departamento duomenimis 2019 m. Lietuvoje buvo pagaminta 308,6 tūkst. t. popieriaus ir jo gaminių (Lietuvos statistikos departamentas, 2020), t. y. remiantis Frías et. al. (2015) nurodytu dumblo susidarymo santykiu, Lietuvoje 2019 m. buvo pagaminta 108 tūkst. t. popieriaus gamybos dumblo (Frías, et al., 2015).

Įvairių kietųjų atliekų ir dumblas susidaro skirtinguose minkštosios masės ir popieriaus gamybos pramoninių technologinių procesų etapuose. Pagrindinis popieriaus gamybos dumblo susidarymo šaltinis yra nuotekų mechaninis ir biologinis valymas. Kietosios atliekos ir dumblas, susidarantys popieriaus gamyboje, skirstomi į pirminį ir antrinį.

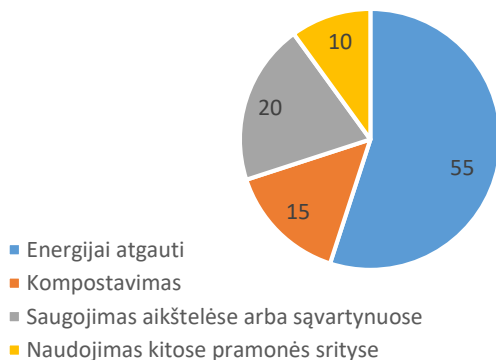
Pirminis (perdirbto popieriaus atliekos) dumblas surenkamas gravitacijos nusodinimo būdu. Pirminio dumblo sudėtyje yra lignoceliuliozės komponentų (celiuliozės, hemiceliuliozės ir lignino), popieriaus gamybos užpildų (kaolino ir kalcio karbonato) (Kairytė, 2017; Ochoa de Alda, 2008).



1.2 pav. Pagaminamo popieriaus kiekis Lietuvoje
(Lietuvos statistikos departamentas, 2019)

Fig. 1.2. Yearly production of the paper sludge
(Lietuvos statistikos departamentas, 2019)

Antrinis (rašalo šalinimo atliekų dumblas) dumblas sudarytas iš trumpų plaušelių arba plaušo dalelių, rašalo dalelių, popieriaus perdirbimo ir dažų nuėmimo tirpalų liekanos. Dažai bei kitos priemaišos perdirbimo metu yra atskiriami flotacijos būdu. Rašalo šalinimo atliekų dumble yra dažų, mažų celiuliozės plaušų dalelių, kurių filtrai nesugauna (Jackson et al., 2000; Monte et al., 2009).



1.3 pav. Popieriaus gamybos dumblo tvarkymas ir panaudojimas, % (Confederation of European Paper Industries, 2017)

Fig. 1.3. Utilisation and usage of paper sludge, % (Confederation of European Paper Industries, 2017)

Griežtėjant aplinkosauginiams reikalavimams ir energijos suvartojimui imta galvoti apie alternatyvius popieriaus gamybos dumblo tvarkymo metodus, nes

tradicinis laikymas atvirose aikštelėse ar sąvartynuose nėra racionalus. 2016 m. Europos popieriaus industrijų konfederacijos duomenimis (1.3 pav.), Europos Sąjungos šalyse sąvartynuose ir saugojimo aikštelėse sandėliuojama 20 % Europos Sąjungoje susidarancio popieriaus gamybos dumblo (Confederation of European Paper Industries, 2017). Tokia praktika pagal atliekų tvarkymo hierarchiją laikoma vengtina. Jeigu atliekos neįmanoma panaudoti pakartotinai, geriausia alternatyva yra jos perdirbimas. Sukūrus produktą, kuris galėtų būti naudojamas perdirbus, būtų uždarytas žiedinės ekonomikos ciklas. Dabartinis šių atliekų tvarkymas tokios alternatyvos neužtikrina.

1.2. Popieriaus gamybos dumblo sudėtis

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

Priklausomai nuo popieriaus gamyklos plaušų sugrąžinimo į popieriaus gamybą sistemos efektyvumo, celiuliozės kiekis popieriaus gamybos dumble gali kisti nuo 15 iki 30 %. Kuo geresnė plaušų atgavimo sistema, tuo mažesnis yra popieriaus gamybos dumblo susidarymo mastas (Bajpai, 2015).

Žaliavos kokybė taip pat labai svarbus aspektas. Kuo geresnės kokybės perdirbamas popierius, tuo mažesnis dumblo susidarymas. Jeigu perdirbamas biuro popierius, kuris yra storesnis ir turi mažiau dažų, palyginus su laikraštiniu popieriumi, galima išgauti daugiau celiuliozės plaušo, kuris naudojamas popieriui perdirbti (Veluchamy & Kalamdhad, 2017).

Popieriaus perdirbimo gamybos atliekų dumblas yra kompleksiškas įvairių medžiagų mišinys (1.1 lentelė). Jį sudaro perdirbto popieriaus plaušas, neorganinės kietosios medžiagos ir cheminiai priedai, kurie buvo naudoti popieriaus gamyboje (Bajpai, 2015). Popieriaus gamybos dumblas gali būti skirstomas į organinį ir neorganinį. Neorganinė dalimi yra laikoma ta dumblo dalis, kurią daugiausia sudaro kalcitas ir talkas, o organinė dalimi laikoma ta popieriaus gamybos dumblo dalis, kuri yra sudaryta iš celiuliozės ir lignino (Wang et al., 2016).

Akustiniu požiūriu plaušinės medžiagos yra laikomos gerai sugeriančiomis garsą. Neretai plaušinės medžiagos yra naudojamos patalpose ir pastatuose tam, kad būtų pagerinta akustinė aplinka. Celiuliozės plaušų buvimas dumble gali daryti įtaką garso sugerties mechanizmui medžiagoje.

1.1 lentelė. Popieriaus gamybos dumblo sudėtis (Frías et al., 2011; Frías et al., 2015; Pera & Amrouz, 1998; Rodríguez Largo et al., 2009; Vigil de la Villa et al., 2007)

Table 1.1. Composition of the paper sludge (Frías et al., 2011; Frías et al., 2015; Pera & Amrouz, 1998; Rodríguez Largo et al., 2009; Vigil de la Villa et al., 2007)

Parametras	Popieriaus gamybos dumblo kiekis, %
Celiuliozė, %	33,4–42,8
Ligninas, %	14,4–27,8
Kalcitas, %	29,0–34,3
Talkas, %	4,2–12,8
Sunkieji metalai, %	0,6–2,78

Plaušeliai popieriaus gamybos dumble yra sąlygiškai trumpi (0,76–1,19 mm), akustiniu požiūriu šis dumblo parametras turės nedidelę įtaką garso sugerčiai ir padės lengviau surišti PGD gaminant plokštę (He & Luu, 2017). Popieriaus gamybos dumblą galima laikyti granuliuota medžiaga. Jo grynasis tankis, priklausomai nuo popieriaus gamybos žaliavos, kinta nuo 44,6 iki 419 kg/m³ (Abdullah, Ishak, et al., 2015; Campbell, Tripepi, 1995; Jain et al., 2018; Migneault et al., 2010).

1.2 lentelė. Sunkiųjų metalų kiekis perdirbto popieriaus gamybos dumble (Abdullah, Fauziah Ishak, et al., 2015; Chandra et al., 2017; LR Aplinkos ministerija, 2001; Veluchamy et al., 2017)

Table 1.2. Quantity of heavy metals in the paper sludge (Abdullah et al., 2015; Chandra et al., 2017; LR Aplinkos ministerija, 2001; Veluchamy et al., 2017)

Parametras	Kiekis	Leistinas kiekis pagal 86/278/EEB	Kategorija pagal Land 20-2001
Kadmis, mg/kg	0,25–2,01	20–40	II
Chromas, mg/kg	18,92–61,3	–	I
Varis, mg/kg	85,4–199	1000–1750	II
Švinas, mg/kg	1,05–81,0	750–1200	I
Cinkas, mg/kg	160,8–358	2500–4000	I, II
Nikelis, mg/kg	3,3–41,6	300–400	I

1.2 lentelėje pateiktos autorių gautos sunkiųjų metalų koncentracijos dumble. Sunkieji metalai dumble atsiranda šalinant rašalus popieriaus perdirbimo procese (Bajpai, 2013). Sunkiųjų metalų kiekis dumble priklauso nuo perdirbamo popieriaus žaliavos (laikraščių, žurnalų, dėžių) rašalo padengimo.

Popieriaus gamybos dumbas pagal Lietuvoje galiojančius teisės aktus priskiriamas prie nepavojingų atliekų. Remiantis įmonės taršos integruotos prevencijos leidimu, popieriaus gamybos dumbas priskiriamas prie kitokio pramoninių nuotekų valymo dumblo (kodas 19 08 14).

Lietuvoje nuotekų dumblo naudojimą reglamentuoja LR aplinkos ministerijos išleistas įsakymas LAND 20-2001 „Nuotekų dumblo naudojimo tręšimui reikalavimai“. Palyginus literatūroje pateiktas koncentracijas su įsakymo reikalavimais, matyti, kad norint popieriaus gamybos dumblą naudoti laukams tręšti reiktų papildomų tręšiamos vietovės dirvožemio tyrimų, nes kadmio, vario ir cinko koncentracijos patenka į II kategoriją. Remiantis Europos Sąjungos direktyva 86/278/EEB, toks dumbas galėtų būti skirtas naudoti žemės ūkyje, tačiau tam yra reikalingi papildomi sunkiųjų metalų tyrimai konkrečiu atveju, nes sunkiųjų metalų kiekis dumble gali varijuoti dėl naudojamų žaliavų. Popieriaus gamybos dumblą yra leidžiama naudoti sąvartynų rekultivacijai, kur yra filtrato surinkimo sistemos.

1.3. Popieriaus gamybos dumblo naudojimas statybos sektoriuje

Šiame poskyryje apžvelgiamos popieriaus gamybos dumblo naudojimo galimybės statybos sektoriuje. Taip pat vis labiau kreipiamas dėmesys į naudojimą statybų sektoriuje. Šiuo metu PGD siekiama panaudoti kaip priedą įvairių statybinių medžiagų (molinių ir betono plytų, cemento, medžio ir plastiko kompozitinių plokščių) gamyboje. Dauguma mokslinių tyrimų šioje srityje atliekami, maišant popieriaus gamybos dumblą su cementu arba moliu, siekiant sukurti naujos kartos gaminius statybų sektoriui. Tokio tipo produktai atitinka šiuo metu šalių nustatytus stiprumo ir toksiškų medžiagų keliamus reikalavimus. Remiantis kitų autorių tyrimais, naudojant gaminius su popieriaus dumblu, galima pasiekti 50 % mažesnę šiluminę laidumą, palyginti su tradiciniais gaminiais (Frias et al., 2015; Goel & Kalamdhad, 2017; Munir et al., 2018; Sarkar et al., 2017; Sutcu & Akkurt, 2009).

Viena iš populiariausių tiriamų popieriaus gamybos dumblo naudojimo sričių yra plytų gamyba. Gaminant plytas su tokiu priedu kaip popieriaus gamybos dumbas, labai svarbu atsižvelgti į plytos sudėtį. Kadangi popieriaus gamybos dumble yra sunkiųjų metalų, reikia įvertinti plytos cheminę sudėtį. Brazilijos mokslininkai (Vieira et al., 2016) savo sukurtų plytų cheminę sudėtį palygino su

standarte nurodytomis reikšmėmis. Standartinę molinę plytą modifikavo pridėdami 30–50 % (nuo plytos masės) popieriaus gamybos dumblo. Pasak mokslininkų, tokia plyta vis dar atitinka Brazilijoje keliamus reikalavimus dėl toksinių medžiagų.

Gaminant tokio tipo plytas yra siekiama panaudoti popieriaus gamybos dumblą tam, kad būtų sumažintas naudojamų neatsinaujinančių gamtos šaltinių naudojimas. Pridėjus priedo pasikeičia plytų mechaninės savybės. Padidėja plytos poringumas, bet sumažėja jos gniuždomasis stipris. Esant 20 % PGD plytoje, jos gniuždomasis stipris sumažėja 70 % (Goel & Kalamdhad, 2017). Indų mokslininkai (Goel & Kalamdhad, 2017) tyrė plytas, sumaišytas su dirvožemiu, ir keitė santykį tarp dumblo ir dirvožemio. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad plytų, pagamintų iš tokių kompozitų, tankis kinta nuo 1,19 g/cm³ iki 1,56 g/cm³, palyginimui statybose šiuo metu naudojamų keraminių pilnavidurių plytų tankis yra 1,69 g/cm³, betono blokelių 1,05 g/cm³. Dumblo ir dirvožemio plytos buvo degintos 900 °C temperatūroje.

Kita plytų gamybos kryptis panaudojant popieriaus gamybos dumblą yra molinės plytos. Turkijos mokslininkai, keisdami molio ir popieriaus gamybos dumblo santykį (nuo 20 iki 50 % popieriaus gamybos dumblo), nustatinėjo plytų stiprumą (Sutcu et al., 2012). Pagrindinė tokios technologijos idėja yra ta, kad didelėje temperatūroje išdegant plytas popieriaus gamybos dumblas sudega, o lieka tik molis, tokiu būdu didinamas plytos poringumas. Mokslininkai nustatė, kad padidinus PGD kiekį plytoje iki 25 % jos stiprumas mažėja 51 %. Plytos stiprumas varijavo nuo 24 iki 47 MPa. Didinant popieriaus gamybos dumblo procentinį kiekį plytoje nustatyta, kad šiluminis laidumas mažėja, didėja plytos garso sugertis, tačiau plytos mechaninis gniuždomasis stipris mažėja (Cusidó et al., 2015; Sutcu et al., 2012).

Akustiniu požiūriu padidėjęs plytų poringumas turėtų padidinti garso sugertį (Shao et al., 2015). Padidėjęs plytos poringumas palengvina garso bangos patekimą į ją, palyginti su mažiau poringomis tradicinėmis plytomis. Teigiama, kad tokios kompozicijos plytų šiluminis laidumas yra mažesnis, palyginti su tradicinėmis plytomis (Raut et al., 2012; Sutcu & Akkurt, 2009). Tyrimais įrodyta, kad šiluminis laidumas koreliuoja su garso sugertimi. Garso sugertis ir šiluminis laidumas yra susiję su medžiagos poringumu. Didelis medžiagos poringumas lemia mažą šiluminį laidumą ir didelę garso sugertį, todėl mineralinės vatos yra gerai šilumą izoliuojančios ir garsą sugeriančios medžiagos (Caniato et al., 2017).

Tiriant keramines plytas su popieriaus gamybos dumblo priedu nustatyta, kad didinant PGD kiekį plytoje šiluminis laidumas mažėja, didėja plytos garso izoliacijatačiau plytos gniuždomasis stipris mažėja (Cusidó et al., 2015).

Kita panaudojimo statybose kryptis yra cemento ir medžio kompozitinių plokščių naudojant popieriaus gamybos dumblą taikymas. Mokslinėje literatūroje yra nagrinėjamos plokštės, kurios sudarytos iš ąžuolo bei pušies ir popieriaus

gamybos dumblo pluoštų, popieriaus gamybos dumblas naudojamas medžio ir plastiko kompozituose, cemento plokštėse. Vis dėlto tokios plokštės nepasižymi dideliu stiprumu, o optimalus popieriaus gamybos dumblo kiekis yra tik 10 % visos masės (Goel & Kalamdhad, 2018).

Mokslininkai ištyrė cemento, medžio drožlių ir popieriaus gamybos dumblo kompozitą akustiniu požiūriu. Jų tirtas kompozito procentinis santykis buvo 51 %:29 %:20 %. Tokio kompozito garso sugerties koeficientas α oktavos dažniuose nuo 125 iki 500 Hz buvo 0,05 iki 0,3, o nuo 500 iki 2000 Hz nuo 0,3 iki 0,8. Tokio tipo kompozitas tiktų konstrukcijoms, skirtoms aukšto dažnio aidėjimui patalpoje mažinti (Donmez Cavdar et al., 2017; Doudart de la Grée et al., 2018; Geng et al., 2007; Soucy et al., 2014).

Literatūroje tiriamas tik gaminių su PGD priedu stiprumas ir poringumas. Esant 40 % popieriaus gamybos dumblo kiekiui, tokių konstrukcijų plokštės praranda stiprumą apie 40 %, palyginti su plokšte be dumblo (Soucy et al., 2014). Literatūroje matyti, kad naudojant popieriaus gamybos dumblą didėja konstrukcijų poringumas, o priklausomai nuo pagrindinės mežiagos stiprumas išlieka pakankamas, todėl tolesniuose tyrimuose bus vis labiau atsižvelgiama į konstrukcijų šilumos ir garso pralaidumą. Taip pat tyrimais buvo įrodyta, kad plokščių kūrimas nenaudojant rišiklio yra neracionalus dėl mažo mechaninio stiprio. Tokių plokščių gniuždomasis stipris yra sąlygiškai mažas, siekia iki 2 MPa (Migneault et al., 2011).

1.4. Garso sklaidos patalpose analizė ir vertinimas

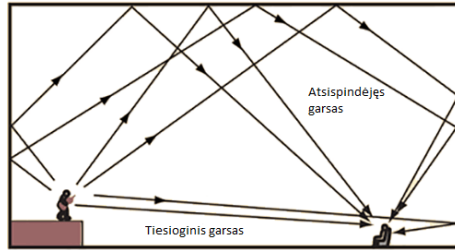
Garso kokybę patalpoje lemia du pagrindiniai patalpų akustikoje nagrinėjami parametrai – reverberacijos trukmė (R_T) ir kalbos perdavimo indeksas (STI). Reverberacija, kaip fizikinis reiškinys, yra garso bangų pasikartojimas dėl nevisiškos garso sugerties patalpoje (1.4 pav.). Bangų pasikartojimu vadinamas reiškinys, kai banga atsimuša nuo garsą nesugėriamųjų paviršių (sienų, lubų, baldų) (Nowoświat & Olechowska, 2016).

Esant mažesnei patalpai reverberacijos trukmė yra daug trumpesnė, palyginti su didesne, nes garso banga per tą patį laiko tarpą pasiekia daugiau atspindžių į patalpos tūrio ribas ir dėl mažesnio bangos judėjimo kelio greičiau nusilpsta. Pažymėtina, kad šiuo atveju garso greičio pokytis dėl temperatūros, slėgio ar drėgmės yra gana nežymus, kad būtų nevertinamas (Mcneer et al., 2017).

Reverberacijos trukmę lemiantys patalpos parametrai yra medžiagos sugerties plotas, kuris yra matuojamas nedimensiniu dydžiu, sabinais ir patalpos tūriu.

$$R_{T,60} = 0,161 \cdot \frac{V}{A} = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S} \text{ (s)}, \quad (1.1)$$

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 sugeriančia medžiaga, m^2 ; V – patalpos tūris, m^3 .



1.4 pav. Reverberacijos patalpoje principinė schema (Soft dB, n.d.)

Fig. 1.4. Principal scheme of reverberation (Soft dB, n.d.)

Iš 1.1 formulės matyti, kad reverberacijos trukmė patalpoje priklauso nuo patalpos tūrio ir garso sugerties ploto. Tokią sugerties ploto ir reverberacijos trukmės skaičiavimo metodiką pasiūlė Harvardo universiteto fizikas Wallace Clement Sabine (Sabine et al., 1966).

Reverberacijos trukmė – vienas iš pagrindinių rodiklių, kuris nusako kalbos suprantamumą patalpoje. Kalbos suprantamumas patalpoje nusakomas nedimensiniu rodikliu *STI*, kuris gali kisti nuo 0 iki 1. Kai *STI* reikšmė yra lygi arba artima 1, tuomet laikoma, kad kalbos suprantamumas yra puikus, esant 0, kalbos suprantamumas labai prastas ir iš esmės beveik neįmanoma suprati perduodamos kalbinės žinutės.

Į šį rodiklį ypač kreipia dėmesį (kino, koncertų, laukimo salių, bažnyčių ir kt.) projektuotojai (Queiroz de Sant'Ana & Trombetta Zannin, 2011). Kalbos suprantamumo rodiklis nusako, kaip aiškiai žmogus supranta jam siunčiamą informaciją, pvz., žodžių aiškumas, muzikos „švarumas“.

Turimos mokslinės žinios rodo, kad pagrindinis parametras, darantis įtaką garso perdavimo indeksui, yra reverberacijos trukmė patalpoje. Dėl šios priežasties daugiausia tyrimų atliekama koncertų ir laukimo salėse, oro uostuose ir įvairiose traukinių, autobusų stotyse. Pastarosiose labai svarbu, kad informacija pasiektų klausytojus (Billon et al., 2008). Siekiant objektyviai nustatyti perduodamos informacijos aiškumą, yra taikomas kalbos perdavimo rodiklis (*STI*).

Standartinė (*STI*) nustatymo metodika yra sudėtinga ir reikalauja daug laiko tyrimui atlikti, todėl mokslininkai ieško paprastesnių būdų kaip nustatyti kalbos perdavimo indeksą (*STI*). 2004 m. Tang ir Yeung (Tang & Yeung, 2004) atliko garso perdavimo indekso tyrimus 18-oje auditorijų. Mokslininkai atliko regresinę

analizę gaudami 100 regresinių kreivių, koreliuojančių tarp (R_T) ir (STI). Gauta stipri regresinė priklausomybė tarp kalbos perdavimo indekso ir reverberacijos trukmės (Leccese et al., 2018; Tang & Yeung, 2004):

$$STI = 0,5895 - 0,4422 \log_{10}(R_T). \quad (1.2)$$

Mokslininkų gautas lygties determinacijos koeficientas (R^2), palyginus su matavimų duomenimis, nustatytas 0,830, standartinė paklaida siekė 0,03. Tai reiškia, kad išvesta regresinė lygtis stipriai koreliuoja su matavimų rezultatais.

2016 m. lenkų mokslininkų atlikti bandymai didelėse patalpose (bažnyčiose) parodė kitokią regresinę lygtį, pritaikytą didelėms patalpoms. Tyrimai buvo atlikti didelėje 5000 m³ bažnyčioje. STI nustatyti gali būti naudojama Nowoswiat ir Olechowska statistiniu regresiniu metodu sukurta amplitudės moduliacijos funkcija (Nowoswiat, Olechowska, 2016), ši funkcija yra pritaikyta taikyti didelėse patalpose:

$$STI = 0,6488 - 0,2078 \cdot \ln(R_T), \quad (1.3)$$

čia STI – kalbos perdavimo indeksas; R_T – reverberacijos trukmė.

Šios gautos lygtys rodo, kad svarbiausias parametras, kuris nurodo garso kokybę patalpoje, yra reverberacijos trukmė.

Italijos mokslininkai (Leccese et al., 2018) atliko mokslininkų pasiūlytų regresinių STI nustatymo funkcijų patikrinamuosius tyrimus panašaus tūrio patalpose (auditorijose). Iš viso mokslininkai atliko tyrimus 11 skirtingų auditorijų. Gauti duomenys rodo, kad regresinės analizės būdu nustatytos logaritminės funkcijos (1.5 formulė) STI rezultatas gaunamas su 0,0265 paklaida, o tiesinės funkcijos (1.4 formulė) – 0,0348. Tyrimai įrodė, kad STI nustatymas yra tikslesnis taikant logaritminę regresinę analizę.

Reverberacijai mažinti dažniausiai naudojamos garsą sugeriančios medžiagos arba įvairūs reflektoriai, kurie atmuša garso bangą ten, kur ji netrukdo klausytojui (Baynes & Godin, 2017). Patalpos aidėjimo mažinimas naudojant garsą sugeriančias medžiagas pirmą kartą buvo pradėtas tyrinėti Harvardo mokslininkų dar XIX a. pirmoje pusėje. Tyrimai rodė, kad, didinant garsą sugeriančių medžiagų plotą patalpoje, mažėja reverberacijos trukmė. Mokslininko Wallace Clement Sabine sukurta reverberacijos trukmės skaičiavimo metodika yra taikoma iki šiol (Ghilahare & Pandey, 2017; Sabine & Dwight, 1966).

Pastaruoju metu kaip būdas reverberacijoms mažinti pradėti taikyti įvairūs reflektoriai, sklaidytuvai ir netiesios lubų formos. Reflektoriai ir lubų formos sukuriamos taip, kad garso banga būtų kreipiama ten, kur netrukdo klausytojui. Tokias sistemas bandoma pritaikyti didelėse auditorijose, kur gali susidaryti

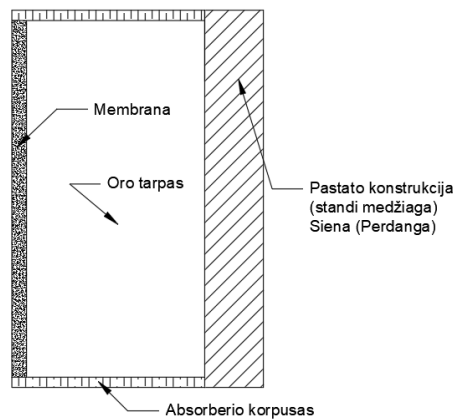
sąlygiškai ilga reverberacijos trukmė (Meissner, 2008; Neubauer & Kostek, 2001; Yang & Hodgson, 2007)

1.5. Pasyviųjų garsą sugeriančių elementų tipai

Patalpų akustikoje reverberacijai mažinti ar rezonansams patalpoje naikinti naudojami skirtingų tipų garsą sugeriantys elementai. Šiame poskyryje apžvelgiami įvairių konstrukcijų, naudojamų garsui sugerti, tyrimai ir konstrukciniai ypatumai. Pagrindinės garso absorberių rūšys yra: membraniniai, Helmholtzo (rezonansiniai) ir porėti absorberiai.

1.5.1. Membraniniai absorberiai

Membraniniais absorberiais (1.5 pav.) vadinamos sistemos, kurios susideda iš plonos medžiagos arba plokštės ir oro tarpo. Galimos variacijos užpildant oro tarpą porėta garsą sugeriančia medžiaga. Tokio tipo absorberiai veikia masės – spyruoklės – 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 stovinčiosios bangos.



1.5 pav. Tipinio membraninio garso absorberio principinė schema (autoriaus brėžinys)

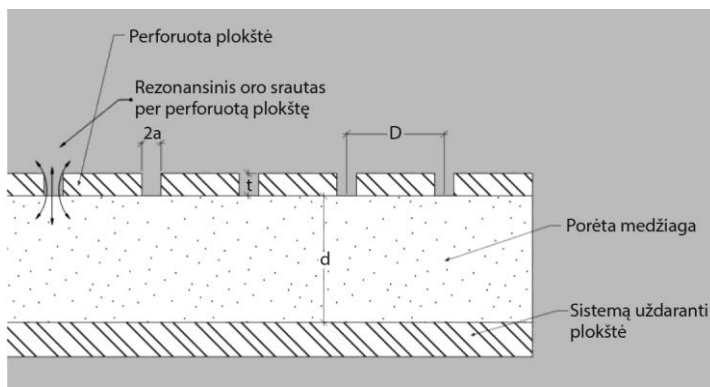
Fig. 1.5. Principal scheme of the typical membrane sound absorber

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 – spyruoklės – masės sistemose platinant sugerties diapazoną prarandamas maksimalus absorberio efektyvumas. Tokių absorberių efektyvumas itin 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).

1.5.2. Helmholtzo absorberiai

Garsą sugeriantys elementai, kuriuos sudaro mikroperforuotos arba perforuotos plokštės ir garso sugerianti medžiaga bei sistemą uždaranti plokštė, vadinamos Helmholtzo absorberiais. Šių absorberių dažninis sugerties spektras priklauso nuo perforacijos porėtumo, porėtos medžiagos garso sugerties ir storio. Šie absorberiai dažniausiai yra naudojami žemiems dažniams sugerti ir yra lengvai apskaičiuojamas jų efektyvumas. Tokio tipo absorberiai dažniausiai naudojami įvairiuose koridoriuose ar klasėse.



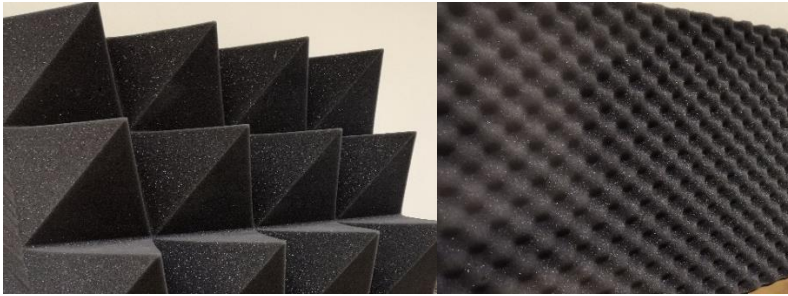
1.6 pav. Tipinio Helmholtzo garso absorberio principinė schema (autorius brėžinys)

Fig. 1.6. Principal scheme of the typical Helmholtz sound absorber

Šių absorberių veikimo principas (schema 1.6 pav.) paremtas perforacijos kaklelio pločiu ir skylės ilgiu, kuris lemia toje vietoje susidarantį akustinės varžos padidėjimą, to pasekmė rezonansinis oro srautas. Tokiu būdu pasiekama garso sugertis gan siaurame dažniniame spektre. Siekiant praplėsti sugerties dažninį spektrą tradiciniuose Helmholtzo absorberiuose, naudojama porėta garso sugerianti medžiaga ir panaikinamas membranos efektas perforuotoje plokštėje (Cox & D’Antonio, 2009; Kumar & Lee, 2020).

1.5.3. Porėti absorberiai

Porėti absorberiai – tai garsą sugeriančios porėtos medžiagos, kurios paprastai yra klijuojamos ant sienų. Porėti absorberiai gali būti gaminami iš įvairių natūralių ir sintetinių medžiagų. Dažniausiai porėti absorberiai būna įvairių banguotų ar iškilų kūgių formos (1.7 pav). Tokios plokštės formos padidina garso sugerties plotą.



1.7 pav. Porėti garso absorberiai (autoriaus nuotrauka)

Fig. 1.7. Porous sound absorbers (author's photo)

Tokia absorberio forma parenkama tam, kad tokia medžiaga ne tik sugertų garsą bet jį ir sklaidytų. Tokiu būdu reverberacijos trukmė sumažėja labiau, palyginti su tokio pačio storio lygaus paviršiaus tokia pat medžiaga. Tokie garso absorberiai naudojami patalpose, kuriose reikia itin didelės garso sugerties: kino salėse, garso studijose, koncertų salėse, kur naudojama garso aparatūra. (Arenas et al., 2020; Cox & D'Antonio, 2009; Taban, Khavanin et al., 2020; Tang & Yan, 2017).

1.6. Medžiagų akustinių savybių sietis su neakustinėmis savybėmis

Medžiagų akustinės savybės – tai savybės, susijusios su tuo, kaip medžiaga reaguoja veikiant garso bangoms. Garso bangos kietomis medžiagomis keliauja sudarydamos mechanines išilgines bangas. Visos elastingos medžiagos gali perduoti garsą. Garsas taip pat keliauja ir fluidais sudarydamas slėgio skirtumus terpėje (Figura & Teixeira, 2008).

Neakustinėmis savybėmis yra laikomos tokios medžiagos savybės, kurios daro įtaką medžiagų akustinėms savybėms (Doutres et al., 2010a).

Laikoma, kad porėtos medžiagos yra sudarytos iš dviejų atskirų komponentų, fluido dalies (oro) ir kietosios dalis (medžiagos). Šių dviejų komponentų sąveika veikiant garsui lemia garso bangos silpninimą.

Projektuojant garsą sugeriančią medžiagą būtina atsižvelgti į pagrindinius medžiagų neakustinių savybių parametrus, kad projektuojama medžiaga ar kompozitas pasiektų norimas akustinių savybių parametrų vertes.

Porėtos medžiagos, kurių kietoji dalis yra elastinga, o fluido dalis yra klampi, vadinamos porėtomis elastingomis medžiagomis. Medžiagų akustinės ir neakustinės savybės pateikiamos 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Medžiagų akustinės ir neakustinės savybės (Doutres et al., 2010a; Figura & Teixeira, 2007)

Table 1.3. Acoustic and non-acoustic properties of the materials (Doutres et al., 2010a; L. O. Figura & Teixeira, 2007)

Medžiagų akustinės savybės	Medžiagų neakustinės savybės
Garso sugertis, –	Medžiagų porėtumas, %
Garso atspindys, –	Orinė varža, Pa·s/m ²
Akustinė varža, Pa s/m	Lenktumas, m
	Būdingasis klampos ilgis, m

Pirmasis garso sklaidą porėtose elastingose medžiagose aprašė M. A. Biot. Jo aprašytoje teorijoje garso bangų sklaida medžiagose buvo aprašyta medžiagų neakustiniais parametrais (Biot, 1956a, 1956b, 2005). Skaičiavimo metodas, kuris yra paremtas Biot teorija, yra vadinamas transformavimo matricos metodu (angl. *transfer matrix method*). Šį metodą galima plačiai taikyti įvairioms skirtingoms medžiagoms (granuliuotoms medžiagoms, porolonams, vatoms). Mokslininkai yra atlikę nemažai darbų su poliuretano putomis ir kitomis porėtomis medžiagomis tam, kad išsiaiškintų neakustinių parametrų svarbą garso sugerčiai.

Doutres et. al. pasiūlė priklausomybės nustatymą tarp poliuretano putų mikrostruktūros ir neakustinių savybių. Dviejuose darbuose pasiūlytos formuluotės yra pakankamai tikslios ir sąlygiškai paprasti sąryšiai (Doutres et al., 2010a, 2011, 2013). Bies ir Hansen tyrė orinės varžos svarbą pluoštinėms ir porolonų medžiagoms. Šie autoriai ištyrė skirtingo tipo akustines medžiagas skirtingiems pritaikymo atvejams, akustiniuose absorberiuose patalpų akustinei kokybei gerinti ir ventiliavimo šachtose ortakių sukeliama triukšmui mažinti (Bies & Hansen, 1980).

Porėtos medžiagos – tai medžiagos, turinčios porų (tuštumų, kanalų, tarpų). Poringumas yra viena svarbiausių medžiagos savybių, darančių įtaką garso sugerčiai. Tam, kad medžiaga kiek įmanoma geriau sugertų garsą, medžiagos

poringumas turi būti kiek įmanoma didesnis. Todėl įvairios vatos ar porolonai, kurių tipinis poringumas yra didesnis kaip 90 %, yra plačiai naudojamos medžiagos garso sugerčiai. Taip pat verta paminėti, kad taikant medžiagą garso sugerčiai atviros poros akutės dydis turėtų būti ne didesnis nei 1 mm (Leclaire, 2017). Porėtos medžiagos gali būti skirstomos į (Panneton, 2017):

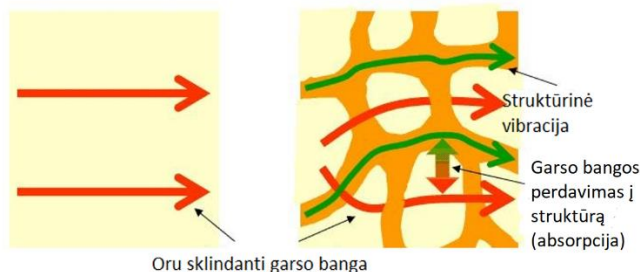
1. Porolonus – tai atvirus tarpus turinčios medžiagos, naudojamos garso sugerčiai ir reverberacijai mažinti kambariuose. Šios medžiagos pasižymi didele orine varža. Tipinis pavyzdys – melanino putos (Panneton, 2017).
2. Pluoštines medžiagas – tai medžiagos, sudarytos iš begalybės kiekio plaušelių, kurie yra išsidėstę chaotiška tvarka. Tipinis pavyzdys – akmens vata (He & Luu, 2017).
3. Kilimus – vientisa plokštė sutaryta iš pluoštinės medžiagos. Kilimai gali būti šiurkštaus ir lygaus paviršiaus (Küçük & Korkmaz, 2016).

Visos šios paminėtos medžiagos gali būti aprašomos neakustiniais parametrais, nuo kurių priklauso pagrindiniai medžiagų akustiniai parametrai (medžiagos garso sugertis ir atspindys).

Vienas svarbiausių porėtą medžiagą aprašančių parametru yra medžiagos porėtumas. Medžiagos porėtumas – tam, kad garso banga galėtų įeiti į medžiagą ir būti nuslopinta dėl trinties, turi būti pakankamas porų kiekis medžiagos paviršiuje. Principinė reiškinių schema pateikta 1.8 paveiksle. Porėtos medžiagos poringumas aprašomas kaip santykis tarp oro tūrio tuštumose ir viso medžiagos tūrio (Allard et al., 1989):

$$\varphi = \frac{V_t}{V_m}, \quad (1.4)$$

čia φ – medžiagos porėtumas; V_t – oro tūris tuštumose; V_m – bendras medžiagos tūris.



1.8 pav. Garso bangos judėjimas per porėtą medžiagą (Cao et al., 2018)
Fig. 1.8. Sound wave propagation through the porous material (Cao et al., 2018)

Orinė varža – tai medžiagos savybė priešintis oro tėkmei per ją. Tai yra viena iš svarbiausių medžiagos savybių, kuri daro įtaką garso sugerčiai. Oro sulaikymas medžiagoje sukelia didesnę trintį medžiagoje, tokiu būdu garso banga praranda dalį amplitudės, toliau banga paprastai keliauja kietuoju kūnu (Hemond, 1983). Orinė varža skaičiuojama pagal formulę (Ingard, Noise Control, 1994):

$$R = \frac{P}{vI}, \quad (1.5)$$

čia P – statinio slėgio skirtumas tarp mėginio priešingų paviršių (dyn/cm^2) ($1 \text{ dyn} = 1 \cdot 10^{-1} \text{ Pa}$); v – oro judėjimo greitis (cm/s); I – mėginio storis (cm).

Lenktumas. Tikrojo atstumo santykis su matomu keliu, kurį oras turi pereiti iš vienos pusės į kitą mėginio pusę, vadinamas lenktumu. Šis santykis priklauso nuo medžiagos poringumo.

$$\alpha_{\infty} = \langle \lambda \rangle / L \geq 1, \quad (1.6)$$

čia λ – vidutinis kelias, kurį nueina fluidas per medžiagą; L – medžiagos storis.

Būdingasis klampos ilgis. Johnson et. al. nustatė būdingą dimensiją, kuri buvo pavadinta būdinguoju klampos ilgiu. Šis parametras nusako klampumo efektus medžiagoje esant aukštiesiems dažniams (Johnson et al., 1987). Šis parametras susijęs su kitomis neakustinėmis savybėmis.

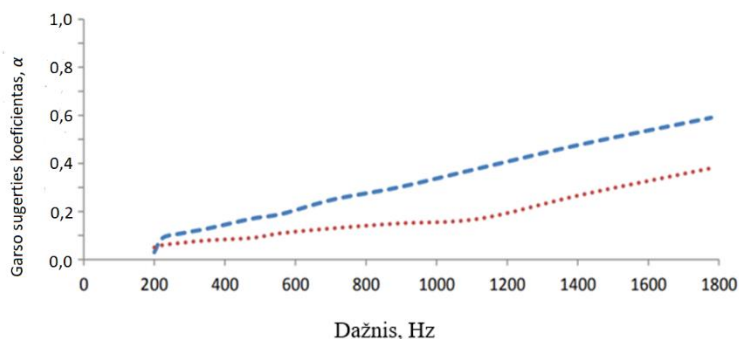
$$\Lambda = \frac{1}{c} \left(\frac{8\eta\alpha_{\infty}}{\sigma\varphi} \right)^{1/2}, \quad (1.7)$$

čia c – garso greitis, η – oro dinaminės klampos koeficientas, σ – orinė varža, φ – poringumas.

Medžiagų garso sugertis tiesiogiai priklauso nuo medžiagos porėtumo ir porų dydžio. Kinijos mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad kietų keramzitinių porėtų medžiagų garso sugertis kinta didinant bendrąjį poringumą ir porų dydį. Didinant bendrąjį poringumą garso sugertis didėja (Frank et al., 2011; Luo et al., 2011).

Medžiagos poringumas taip pat tiesiogiai priklauso nuo medžiagos tankio, didinant medžiagos tankį didėja dalelių trintis medžiagoje. Koizumi et al. (2002) nustatė, kad mažesnio tankio ir atviresnės struktūros medžiagos geriau sugeria garsus žemesniame (500 Hz) dažnyje, o tankesnės struktūros medžiagos geriau veikia aukštesniuose (2000 Hz ir daugiau) dažniuose (Seddeq, 2009).

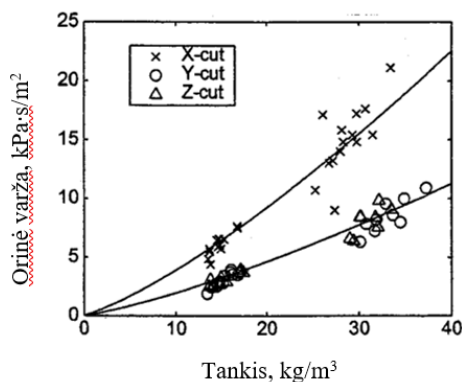
Plaušų dydis medžiagoje daro įtaką medžiagos poringumui ir lenktumui. Mokslininkai Koizumi et al. (2002) nustatė, kad garso sugerties koeficientas didėja mažinant plaušelių skersmenį. Jei naudojami plonesni plaušeliai, tame tūryje yra daugiau plaušelių ir yra sukuriama didesnis medžiagos šiurkštumas, taip sukuriamas didesnė trintis tarp oro dalelių medžiagoje. Sudarius tokias sąlygas padidėja garso sugertis (Jackson et al., 2000; Koizumi et al., 2002).



1.9 pav. Garso sugerties palyginimas tarp pluoštinės kanapės (mėlyni brūkšneliai) ir ryžių šiaudų (raudoni taškai) pluoštų (Zunaidi et al., 2017)

Fig. 1.9. Comparison of cannabis fiber (blue dashes) and rise straw (red dots) in sound absorption (Zunaidi et al., 2017)

Ryžių šiaudų pluošto atskiro plaušelio skersmuo yra didesnis palyginti su pluoštinės kanapės. Eksperimentiniais tyrimais mokslininkai parodė, kad esant siauresniems plaušeliams yra gaunama didesnė garso sugertis (1.9 pav.) (Zunaidi et al., 2017).



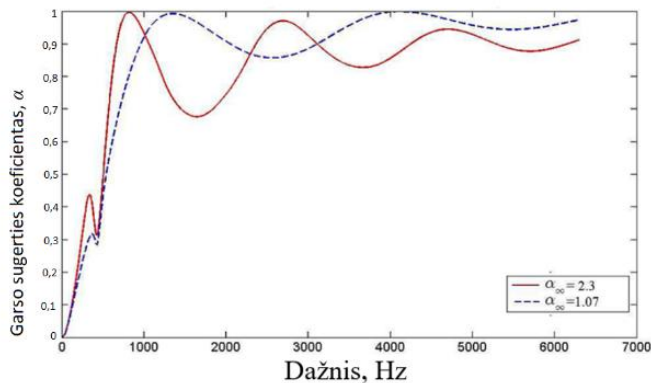
1.10 pav. Orinės varžos priklausomybė nuo tankio (Tarnow, 2002)

Fig. 1.10. Dependency of airflow resistivity on sound absorption (Tarnow, 2002)

Orinė varža yra medžiagos savybė, kuri tiesiogiai priklauso nuo medžiagos porėtumo ir atvirų porų kiekio, tankio. Mokslininkas Tarnow analizavo šią medžiagos savybę. Naudojant stiklo vatą buvo keičiamas jos tankis ir matuojamas oro pasipriešinimas (1.10 pav.). Gautas oro pasipriešinimo kreivės rodo, kad didinant porėtos medžiagos tankį didėja oro judėjimo pasipriešinimas medžiagoje (Tarnow, 2002). Orinė varža ir būdingasis klampos ilgis yra priklausomi vienas

nuo kito. Jeigu porų dydis yra mažinamas, tuomet didėja orinė varža, o tuo pat metu mažėja būdingasis klampos ilgis (Asadi et al., 2015b; Matyka et al., 2008).

Didėjant medžiagos lenktumui, garso sugertis didėja žemesniuose dažniuose, tačiau pastebimos fluktuacijos aukštesniuose nei 1000 Hz dažniuose, esant mažesniai lenktumui, garso sugerties kreivė yra lygesnė 1.11 pav. (Asadi et al., 2015a).



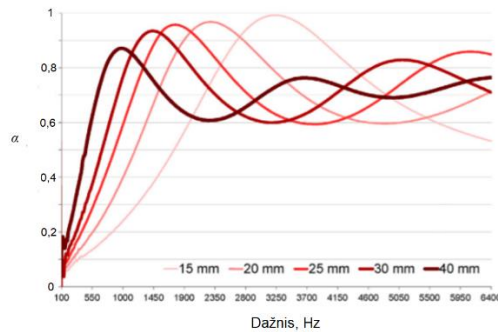
1.11 pav. Garso sugerties priklausomybė nuo medžiagos lenktumo (Asadi et al., 2015a)

Fig. 1.11. Dependency of sound absorption on tortuosity of the material (Asadi et al., 2015a)

Šiuo metu popieriaus gamybos dumblas kaip pavienė medžiaga nebuvo tirta akustiniu požiūriu. Popieriaus gamybos dumblą siekiama panaudoti sunkiose statybinėse konstrukcijose, siekiant pagerinti šilumos izoliacines savybes.

Granuliuotos medžiagos yra laikomos porėtomis. Granulės viena su kita niekada idealiai nesusiglaudžia, todėl tarp dalelių būna oro tarpai (makroporingumas), kurie potencialiai gali daryti teigiamą įtaką garso sugerčiai. Granuliuotomis garsą sugeriančiomis medžiagomis laikomi kai kurie asfaltai, poringas cementas, granuliuotas molis, smėliai, žvyrai ir dirvožemiai (Asdrubali & Horoshenkov, 2009).

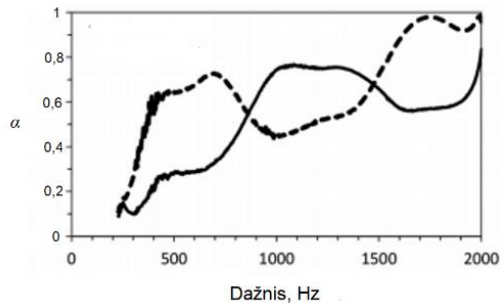
2017 m. buvo pasiūlyta nauja izoliacinė granuliuota medžiaga – silicio aerogelis. Italijos mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad granuliuotas aerogelis gali būti geras šilumos izoliatorius (šilumos laidumo koeficientas 0,05 W/mK) ir pasižymi aukšta garso sugertimi. Varijuojant dalelių dydžiu (0,01–1,2 mm; 0,7–2,0 mm; 0,7–4,0 mm; 1,2–4,0 mm) ir mėginio storiu (15 mm; 20 mm; 30 mm; 40 mm) gauti rezultatai parodė, kad tokios medžiagos garso sugerties koeficientas tam tikruose dažniuose gali siekti $\alpha = 0,95$ esant 1700 Hz dažniui. Optimalus rezultatas buvo pasiektas esant 0,01–1,2 mm dalelėms (1.10 pav.) (Buratti et al., 2017).



1.12 pav. Aerogelio garso sugertis esant skirtingiems storiams. Frakcijos dydis 0,01 – ,2 mm (Buratti et al., 2017)

Fig. 1.12. Sound absorption of different thickness aerogel. Grain size 0.01–1.2 mm (Buratti et al., 2017)

Taip pat ieškoma įvairių natūralių granuliuotų medžiagų panaudojimo garso sugerčiai galimybių. 2015 m. Kanados ir Italijos mokslininkai tyrė nendrių žievių granulių garso sugertį (Berardi & Iannace, 2015). Gautos granulės buvo 4 cm ilgio, 1 cm pločio ir 0,3 cm storio. Tirtas 4 cm ir 8 cm mėginys parodė, kad granuliuotų medžiagų garso sugerties spektras kinta didinant granuliuotos garsą sugeriančios medžiagos storį.



1.13 pav. Nendrių žievės granulių garso sugertis. Brūkšninė linija – storis 8 cm, ištisinė linija – storis 4 cm (Berardi, Iannace, 2015)

Fig. 1.13. Sound absorption of reed bark granules. Dashed line – thickness 8 cm, solid line – thickness 4 cm (Berardi, Iannace, 2015)

Grafike (1.13 pav.) matyti, kad padidinus granuliuotos medžiagos storį garso sugertis padidėjo žemesniuose dažniuose iki 800 Hz, tačiau pastebimas garso sugerties koeficiento kritimas 800–1500 Hz diapazone, o aukštesniuose dažniuose garso sugerties koeficientas didesnis storesniame mėginyje.

Malaizijos mokslininkai taip pat patvirtina šį fenomeną teigdami, kad garso sugerties pikai dažnių diapazone dėl medžiagos storio kinta, todėl medžiagoje susidaro ketvirčio bangos ilgio sluoksnio rezonansas (Mamtaz et al., 2017).

Garso sugerčiai įtaką daro ir oro tarpas už porėtos medžiagos tarp jos ir standaus paviršiaus. Nemažai tyrimų buvo atlikta, siekiant ištirti šį fenomeną. Eksperimentiniais tyrimais buvo nustatyta, kad įterpus į akustinę sistemą oro tarpą garso sugerties koeficientas žymiai padidėja (Muhammad et al., 2012; Mvubu et al., 2019). Oro tarpo dydis lemia, kuriuose dažniuose garso sugertis bus didžiausia (Forouharmajd & Mohammadi, 2018). Didinant oro tarpą garso sugerties maksimumas slenkasi į žemesnius dažnius (Elwaleed et al., 2013).

1.7. Medžiagų akustinių savybių nustatymo tyrimai ir metodai

Garso sugerties koeficientas matuojamas dviem pagrindiniais metodais:

- Garso sugerties koeficiento nustatymas aidėjimo kameroje. Tyrimo metodika aprašoma tarptautiniame ISO standarte *Akustika. Garso sugerties matavimas aidėjimo kameroje* (ISO 354).
- Garso sugerties koeficiento nustatymas interferometru. Tyrimo metodika aprašoma tarptautiniame standarte *Akustika. Akustika. Garso sugerties koeficiento ir pilnutinės varžos nustatymas interferometrais. 2 dalis. Perdavimo funkcijos metodas* (ISO 10534-2).

1.7.1. Garso sugerties koeficiento nustatymas aidėjimo kameroje

Aidėjimo kamera (1.14 pav.) – tai tokia patalpa, kurioje yra didelė reverberacijos trukmė. Paprastai *in situ* sąlygomis nustatinėjamas 20 dB garso slėgio lygio nukritimo laikas, o aidėjimo kameroje nustatinėjamas 60 dB. Tam, kad tyrimai būtų reprezentatyvūs, aidėjimo kameros tūris turi būti bent 150 m³, rekomenduojamas aidėjimo kameros tūris yra 200 m³.

Atliekant reverberacijos trukmės tyrimus privaloma sukurti difuzinį lauką, t. y. per keletą bandymų pasiekti, kad garso slėgio lygis patalpoje būtų tolygus. Tai paprastai pasiekama keičiant garso šaltinių ir mikrofonų pozicijas ir kameroje naudojant sklaidytuvus (West et al., 2018).

Aidėjimo kameroje atliekami aidėjimo trukmės R_{T60} tyrimai. Tyrimai atliekami dvejomis stadijomis:

1. Atliekamas aidėjimo trukmės tyrimas tuščioje aidėjimo kameroje.

2. Atliekamas aidėjimo trukmės tyrimas aidėjimo kameroje, kai yra padėtas bandinys.



1.14 pav. Didelio tūrio aidėjimo kamera

Fig. 1.14. Large scale reverberant room

Bandinio plotas didelėje aidėjimo kameroje turi būti nuo 10 iki 12 m², kad būtų galima nustatyti skirtumą tarp reverberacijos trukmės esant bandiniui aidėjimo kameroje ir jo nesant. Tyrimai didelio tūrio aidėjimo kameroje reikalauja sąlygiškai didelio mėginio tam, kad būtų galima atlikti tyrimą. Praktika rodo, kad tai yra finansiškai brangus tyrimas, ypač jai norima ištirti naują medžiagą. Siekiant sumažinti kaštus yra kuriami mažo tūrio aidėjimo kambariai (1.15 pav.). Naujausi tyrimai rodo, kad patikimus duomenis galima gauti ir mažesnėje aidinčioje kameroje, kurios tūris siekia iki 1,2 m³, o bandinio plotas yra sumažinimas iki 0,3 m² (Del Rey et al., 2017).



1.15 pav. Mažo tūrio aidėjimo kambarys (Del Rey et al., 2017)

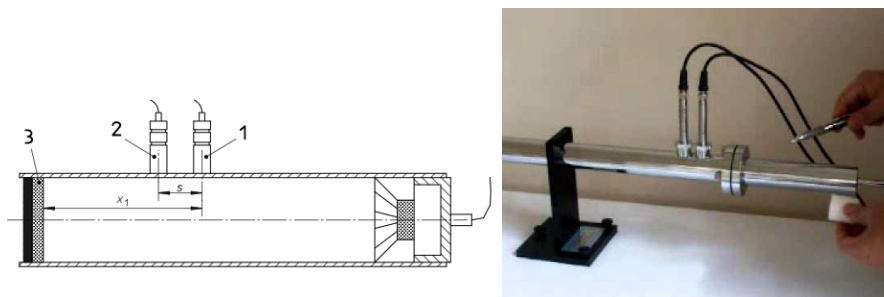
Fig. 1.15. Small scale reverberant room (Del Rey et al., 2017)

Tačiau tokios aidėjimo kameros naudojimas labai priklauso nuo dominančio dažninio spektro, nes tokioje aidėjimo kameroje neįmanoma išmatuoti garso sugerties koeficiento žemesniuose dažniuose. Tą riboja mažo tūrio patalpa.

Pažymėtina, kad tokio tipo aidėjimo kamerose labai svarbu tinkamai pasirinkti mėginį, nes tokio tipo aidėjimo kameroje rezultatai yra labai jautrūs paviršiaus ploto skirtumui. Mažose aidėjimo kamerose neįmanoma išmatuoti garso sugerties žemesnėse nei 125 Hz oktavos dažnių juostose (Hernandez et al., 2014).

1.7.2. Garso sugerties nustatymas interferometru

Interferometras (1.16 pav.) – tai įrenginys, skirtas medžiagos garso sugerčiai nustatyti. Jį sudaro du mikrofona, garso šaltinis, vieta bandinio įtvirtinimui ir vamzdis, per kurį keliauja garso banga. Interferometras kaip įrenginys yra pranašesnis už aidėjimo kamerą tuo, kad naudojamas mėginys yra mažas (29–100 mm pločio ir 29–100 mm ilgio) ir juo netiesioginiais metodais galima nustatyti medžiagos neakustinius parametrus: orinę varžą, porėtumą, lenktumą (angl. *tortuosity*) (Doutres et al., 2010a; Umnova et al., 2005).



1.16 pav. Interferometro principinė schema ir nuotrauka: 1 – mikrofona A; 2 – mikronas B; 3 – bandinys (ISO 10534-2)

Fig. 1.16. Principal scheme of the impedance tube: 1 – microphone A; 2 – microphone B; 3 – sample (ISO 10534-2)

Interferometro vidus turi būti kiek įmanoma lygesnis. Lygesnis paviršius mažiau sugeria leidžiamą garsą, todėl interferometras yra tikslesnis matuojant akustinius medžiagos parametrus. Vokietijoje, Danijoje ir Jungtinėse Amerikos valstijose dažniausiai naudojami interferometrai, pagaminti iš nerūdijančiojo plieno, ši medžiaga yra tvirta ir sąlygiškai lengvai apdirbama, kad galima būtų išgauti lygų interferometro vidaus paviršių. Tačiau tose pačiose šalyse, priklausomai nuo poreikio, yra naudojami interferometrai, kurie yra pagaminti iš aliuminio ar net PVC medžiagų (Liu & Jacobsen, 2005).

Interferometrai skiriasi savo parametrais, priklausomai nuo norimų ištirti savybių. Pagrindinis tokio įrenginio parametras yra vamzdžio skersmuo.

Interferometro skersmuo nusako, kokiose dažnio ribose galima matuoti garso sugerties koeficientą (1.4 lentelė)

1.4 lentelė. Matavimo dažnio ribos dėl interferometro skersmens (Panneton, 2017)

Table 1.4. Limits of measuring frequency range due to diameter of impedance tube (Panneton, 2017)

Klasė	Skersmuo, mm	Žemiausia galima dažnio vertė f_{min} , Hz	Aukščiausia galima dažnio vertė f_{max} , Hz
Siauras	29	172	6897
Vidutinis	44,5	112	4494
Platus	100	50	2000

1.4 lentelėje matyti, kad didinant vamzdžio skersmenį galima matuoti žemesnio dažnio garso sugerties koeficientus.

Interferometru tiesiogiai yra matuojamas garso lygis dvejais mikrofonais. Iš tiesioginių matavimų nustatomas garso atspindėjimo faktorius r , iš kurio netiesiogiai perskaičiuojamas garso sugerties koeficientas α (Atalla & Panneton, 2005; da Silva et al., 2013).

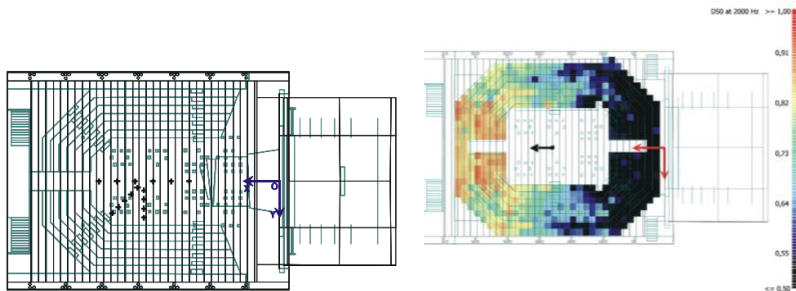
Netiesioginiais metodais naudojantis interferometru įmanoma nustatyti medžiagų fizikinius parametrus. Kanados autoriai Panneton ir Olly pasiūlė metodus, kaip interferometru galima nustatyti medžiagų poringumą, orinę varžą (da Silva et al., 2013; Panneton & Olly, 2006). Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad teorinis modelis sutampa su eksperimentiniais rezultatais (Doutres et al., 2010a). Komerciniai interferometrai yra brangūs ir dažnai sunkiai įperkami Rytų Europos, Azijos, Afrikos ir Pietų Amerikos mokslo institucijoms. Mokslininkai yra pasiūlę pigaus interferometro dizainą (da Silva et al., 2013; Deshpande & Rao, 2014). Straipsniuose yra detalai aprašyta, kaip reiktų sumontuoti interferometro vamzdį, kokią duomenų apdorojimo sistemą naudoti. Interferometruose naudojami $\frac{1}{2}$ arba $\frac{1}{4}$ colio mikrofonsai, mikrofono membranos dydis lemia mikrofono jautrumą slėgio pokyčiams, kuo mažesnis mikrofonas, tuo jis jautresnis.

Autoriai teigia, kad jų sumontuoti interferometrai iš pigių medžiagų gali būti naudojami studentams mokytis, tačiau moksliniams tyrimams tikslumas gali būti ir nepakankamas (Suhaneck et al., 2008).

1.8. Patalpų akustikos modeliavimo programų apžvalga

Šiame skyriuje yra apžvelgiamos patalpų akustikos modeliavimo programos. Tokio tipo programos skirtos garso sistemų, koncertų, kino teatro salėms projektuoti.

Odeon modeliavimo programa yra skirta patalpų garso kokybės parametrams modeliuoti. Šia programa galima spręsti uždavinius, susijusius su garso sklaida patalpose, reverberacijos trukmė trimatėje erdvėje. Programa turi didelę įvairių medžiagų sugerties koeficientų bazę. Ši programa paremta garso bangų sekimo / sklaidos (angl. *ray tracing method*) iš šaltinio metodu. Šiuo metodu yra skaičiuojama pirmoji ir atspindėjusios / išsklaidytos garso bangos. Skaičiuojant atspindžius yra laikomasi prielaidos, kad kambarys yra homogeniškas aidintis laukas (Naylor, 1993). Atspindinčioms garso bangoms naudojantis *Odeon* programa galima nustatyti atspindžio laiką po išspinduliavimo, bangos galią aštuoniose oktavos dažnių juostose ir atspindėjimo kampą. Informaciją apie patalpoje esančius garsą sugeriančius paviršius įveda operatorius.



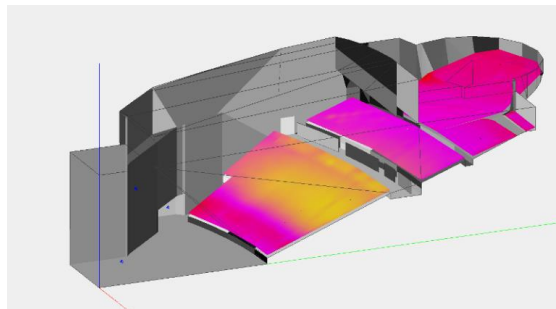
1.17 pav. Teatro salės modelis (Gil-Reyes et al., 2011)

Fig. 1.17. Model of the theater hall (Gil-Reyes et al., 2011)

Autorių teigimu, teorinis *Odeon* modelis nuo eksperimentinių tyrimų vertinant reverberacijos trukmę skyrėsi 8,1 % (Astolfi et al., 2008; Hodgson et al., 2008). Šią programą akustikos inžinieriai naudoja projektuodami koncertų, kino, teatrų sales, klases, auditorijas ir t. t. Pavyzdinis teatro salės modelis, sukurtas *Odeon* programa, pateiktas 1.17 paveiksle. Šiuo modeliu siekta išsiaiškinti, kurioje operos teatro salės vietoje aiškiausiai girdimas dainavimas atsižvelgiant į klausytojų atstumą nuo garso šaltinio (operos solisto) ir patalpos geometriją (Gil-Reyes et al., 2011)

EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) yra programa, skirta garso sklaidai kambariame tirti. Ja galima nustatyti reverberacijos trukmę patalpoje,

bangų judėjimo kryptį po išspinduliavimo iš šaltinio. Ši programa turi didelę tiek garsą sugeriančių medžiagų, tiek skirtingų garso šaltinių duomenų bazę. Tokios duomenų bazės inžinieriams padeda paprasčiau išgauti realios situacijos skaitmeninį modelį. EASE modeliavimo programa, kaip ir *Odeon*, yra paremta garso bangų sekimo / sklaidos (angl. *ray tracing method*) iš šaltinio metodu. Šiuo metodu programa skaičiuoja kiekvienos dalelės virpesių slopimą per laiko tarpą, vertinant atspindinčių paviršių garso sugerties koeficientus (Rindel, 2000). Ši programa yra sudėtingesnė naudoti palyginti su *Odeon*, bet dėl savo mažesnės kainos ir galimybės pasirinkti skirtingus garsiakalbius yra naudojama projektuotojų ir inžinierių. 1.18 pav. pateiktas koncertų salės garso lygio modeliavimas (Davis & Mackenzie, 2014).



1.18 pav. Garso lygis į plotą, parengtas modeliavimo programa EASE (Davis & Mackenzie, 2014)

Fig. 1.18. Sound level in the specified area modelled with EASE software (Davis & Mackenzie, 2014)

CARA (*Computed Aided Room Acoustics*) yra paprastesnė ir žymiai pigesnė patalpų akustikos modeliavimo programa. Ši vokiečių įmonės sukurta programa yra mažoms patalpoms, gyvenamųjų namų svetainėms, kur paprastai yra naudojamos garso sistemos, modeliuoti. Šios programos pagrindinis tikslas apskaičiuoti, kur patalpoje gali susidaryti stovinčiosios bangos ir koks yra rezonansinis dažnis, jei patalpoje nėra garsą sugeriančių paviršių. CARA programinės įrangos pagrindinis tikslas yra pagelbėti inžinieriams projektuojant namų garso sistemas (Chawla, 2002).

I-SIMPA – tai atviro kodo patalpų akustikos modeliavimo programa. Ši programa gana dažnai yra naudojama mokslininkų būtent todėl, kad ji atviro kodo, o tai reiškia, kad ji yra nemokama ir gali būti nuolat tobulinama pačių vartotojų pagal jų specifinius poreikius. Pagrindinis I-SIMPA paketas paremtas garso bangų sekimo / sklaidos (angl. *ray tracing method*) iš šaltinio metodu, kaip ir *Odeon* bei EASE programinė įranga (Setton, 2017). Pagrindinė I-SIMPA stiprybė yra ta, kad tai yra atviro kodo programa:

- Vartotojai gali būti laikomi programinės įrangos vystytojais.
- Naujesnės programos versija išleidžiama anksčiau, kad vartotojai padėtų ištaisyti galimas klaidas.
- Vystytojai visada žino, kuria kryptimi reikia tobulinti programą (Delp et al., 2007).

Visi šie atviro kodo principai lemia tai, kad ši programa yra populiari akademinėje bendruomenėje. Tačiau ši programa turi ir savų trūkumų. Kitaip, nei naudojant *Odeon* ir *EASE* programas, ši programa neturi garsą sugeriančių medžiagų ir garsiakalbių duomenų bazių, visi šie parametrai turi būti įvedami operatoriaus. Kitaip nei mokamų programų, *I-SIMPA* valdymas yra gerokai sudėtingesnis ir reikalauja laiko išsiaiškinti, kaip reikia teisingai atlikti skaičiavimus (*I-SIMPA*, 2018; Picaut & Fortin, 2012; Thomas, 2017).

Visos programos paremtos garso bangų sekimo metodu. *Odeon* šiuo metu yra pranašiausia modeliavimo programa, ji yra lengva pradėti naudoti ir turi didžiausią garsą sugeriančių medžiagų duomenų bazę. Patalpų akustikos modeliavimo programos skaičiavimus atlieka remiantis tomis pačiomis fizikinėmis lygtimis, todėl reverberacijos trukmės prognozavimo tikslumas yra panašus. Esminiai skirtumai tarp programų yra: vartotojo sąsaja, duomenų iškėlimas ir skaičiavimo greitis (skaičiavimo optimizavimas).

1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir uždavinių formulavimas

1. Popieriaus gamybos dumblo susidarymas yra atliekų tvarkymo problema Lietuvoje bei pasaulyje. Remiantis Europos Sąjungos direktyvoje nurodomais 86/278/EEB reikalavimais, susidariusių atliekų negalima šalinti į sąvartynus, todėl svarbu surasti alternatyvius būdus šioms atliekoms panaudoti. Popieriaus gamybos dumblas sudarytas iš 5 pagrindinių komponentų, kurių kiekis dumble kinta priklausomai nuo popieriaus gamybos efektyvumo. Popieriaus gamybos dumble yra: celiuliozės (33,4–42,8 %), lignino (14,4–27,8 %), kalcito (29,0–34,3 %), talko (4,2–12,8 %) ir sunkiųjų metalų (0,6–2,78 %).
2. Popieriaus gamybos dumblas yra naudojamas įvairiems statybiniams kompozitams kurti. Popieriaus gamybos dumblas, atsižvelgiant į jo poveikį kitų autorių gaminamų plytų / plokščių porėtumui, gali būti naudojamas konstrukcijose, skirtose garsui sugerti. Tačiau iki šiol tyrimai nebuvo atliekami tokio pobūdžio žinioms įgyti, kai pagrindinė medžiaga kompozite yra popieriaus gamybos dumblas. Mokslinėje literatūroje yra nagrinėjamos plokštės, kurios sudarytos iš ažuolo bei pušies ir popieriaus

gamybos dumblo pluoštų, popieriaus gamybos dumblo naudojimas medžio ir plastiko kompozituose, cemento plokštėse. Esant kompozito procentiniam santykiui: cementas 50 %, medžio drožlės 29 %, popieriaus gamybos dumblas 20 %, garso sugerties koeficientas α oktavos dažniuose nuo 125 iki 500 Hz buvo 0,05 iki 0,3, o nuo 0,3 iki 0,8 buvo 500–2000 Hz. Toks kompozitas yra geras garso sugėrikis aukštuose dažniuose.

3. Projektuojant garsą sugeriančias medžiagas būtina atsižvelgti į pagrindinius medžiagų neakustinių savybių parametrus, kad projektuojama medžiaga ar kompozitas pasiektų norimas akustinių savybių parametrų vertes. Tam, kad medžiaga sugertų garsą, ji turi turėti atvirą poringumą ir turėti lenktas poras. Garso sugertis gali būti siejama su medžiagos orine varža. Orinė varža yra makrostruktūrinis parametras, aprašantis medžiagos poringumą ir porų lenktumą. Pasiekus per dideles orinės varžos vertes, garso sugertis mažėja, kaip ir esant per mažai orinei varžai.
4. Visos apžvelgtos patalpų akustikos modeliavimo programos veikia bangų sekimo / sklaidos (*angl. ray-tracing*) metodu. Pagrindinis skirtumas tarp programų yra garsą sugeriančių medžiagų duomenų bazių bibliotekos dydis, vartotojo sąsaja. Šiuo metu didžiausia duomenų bazė priklauso Odeon patalpų akustikos modeliavimo programai.
5. Pasyviuosius garso absorberius galima suskirstyti į tris pagrindines grupes: membraniniai, Helmholtzo ir porėti absorberiai. Šie absorberiai gali būti kombinuojami tarpusavyje. Žemo dažnio garsams sugerti dažniausiai naudojami membraniniai absorberiai.

Atlikus mokslinės literatūros analizę, nustatyta, kad žinios apie popieriaus gamybos dumblo ir jų kompozitų akustines savybes yra ribotos, o PGD pritaikomumas yra mažai nagrinėtas, todėl būtina:

1. Suprojektuoti ir pagaminti medžiagų orinės varžos ir garso sugerties matavimo standus, siekiant charakterizuoti popieriaus gamybos dumblo kompozitų orinę varžą ir garso sugertį.
2. Įvertinti PGD kiekio, dalelių dydžio, ir rišiklių įtaką normalinio kritimo kampo garso sugerčiai (α).
3. Teoriniais tyrimais įvertinti PGD kompozitų garso sugertį, eksperimentinio tyrimo duomenis praplėsti teorinio skaičiavimo duomenimis.
4. Remiantis atliktais tyrimais, sukurti garso absorberį, kuriame naudojama popieriaus gamybos dumblo garsą sugerianti plokštė.

5. Atlikti sukurtos konstrukcijos teorinį reverberacijos trukmės tyrimą, naudojantis patalpų akustikos modeliavimo programa *Odeon*. Šiuo uždaviniu nustatomas galimas konstrukcijos efektyvumas realiomis sąlygomis.

Popieriaus gamybos dumblo akustinių ir neakustinių savybių charakterizavimo ir reverberacijos trukmės skaitinio modeliavimo metodikos

Išdžiovintą popieriaus gamybos dumblą akustiniu požiūriu galima laikyti granuliuota medžiaga. Tai leidžia daryti prielaidą, kad popieriaus gamybos dumblas ir jo kompozitai gali būti naudojami kaip garsą sugerianti medžiaga. Norint suformuoti plokštę iš popieriaus gamybos dumblo naudojami rišikliai. Kadangi nėra žinių, kaip akustiškai veikia popieriaus gamybos dumblas kompozitų prototipams kurti, naudojamos gerai išnagrinėtos rišamosios medžiagos, gesintos kalkės, molis ir cementas.

Tyrimų tikslas – ištirti skirtingų rišamųjų medžiagų ir jų kiekio poveikį PGD kompozito garso sugerčiai. Atlikti orinės varžos ir garso sugerties tyrimus, parinkti optimalų rišiklio ir popieriaus gamybos dumblo santykį, optimizuojant kompozitinės medžiagos garso sugertį. Remiantis gautais rezultatais, popieriaus gamybos dumblo kompozitinę plokštę pritaikyti konstrukcijai, kuri skirta garsui sugerti.

Šiame skyriuje tiriamojoje dalyje pristatytos popieriaus gamybos dumblo kompozitinių mėginių paruošimo, teorinių, bei eksperimentinių tyrimų metodikos.

Skyriaus tematika paskelbti septyni autoriaus moksliniai straipsniai (Astrauskas, Januševičius, et al., 2021; Astrauskas, Picó, et al., 2021; Astrauskas & Grubliauskas, 2018, 2019; Astrauskas & Grubliauskas, 2020a, 2020b, 2021).

Gautas Lietuvos Respublikos patentas, patentu numeris LT 6879 (Astrauskas, Grubliauskas, 2022).

2.1. Mėginių paruošimo ir granulimetrinės analizės metodika

Eksperimentiniams tyrimams popieriaus gamybos dumbblas buvo paimtas iš popieriaus gamybos ir perdirbimo įmonės. Įmonėje PGD saugomas atviroje dumblo saugojimo aikštelėje. Dumbblas skirtingose kaupo pusėse gali skirtis savo savybėmis dėl galimai skirtingos žaliavos (perdirbamo popieriaus storio, dažų kiekio), todėl PGD buvo paimtas iš skirtingų kaupo pusių. Po paėmimo PGD buvo homogenizuotas.

2.1 lentelė. Sunkiųjų metalų kiekiai popieriaus gamybos dumble

Table 2.1. Quantity of heavy metals in the PS

Elementas	Cr, mg/kg	Cu, mg/kg	Ni, mg/kg	Pb, mg/kg	Zn, mg/kg	Hg, mg/kg
Reikšmė	4,91 ±0,87	22,6 ±3,5	<0,5	3,71 ±0,58	288 ±27	0,11

PGD yra priskiriamas nepavojingų atliekų grupei. PGD cheminių elementų sudėtis pateikta 2.1 lentelėje. Popieriaus gamybos dumblo bendras azoto kiekis siekia 1100 ± 94 mg/kg, sausos medžiagos 466 ± 20 g/kg, o dumblo pH $8,0 \pm 0,2$.

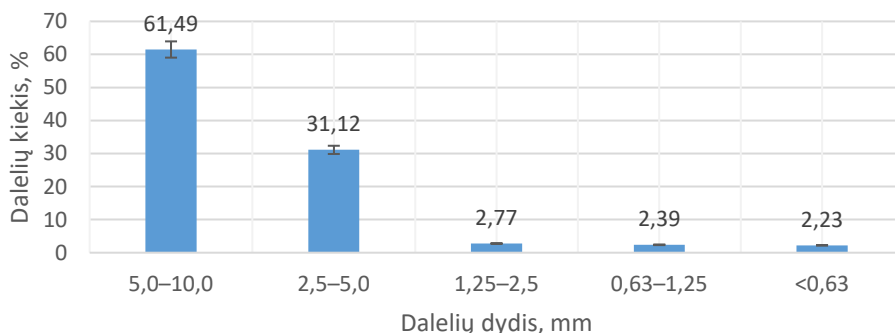
Prieš ruošiant mėginius popieriaus gamybos dumblo žaliava yra džiovinama 60°C temperatūroje, džiovinimas trunka 7 paras. Vėliau išdžiovintas dumbblas yra trupinamas žiauniniu trupintuvu bei sijojamas. Nustatoma bendra granulimetrinė sudėtis. Naudoto žiauninio trupintuvo žiaunų plotis reguliuojamas nuo 2 iki 15 mm. Vėliau atliekama PGD granulimetrinės sudėties analizė. Nustatomas skirtingo didumo dalelių kiekis procentais tų dalelių bendrojo skaičiaus arba jų masės atžvilgiu. Atlikus sijojimą nusėdusios ant sietų dalelės buvo pasveriamos. Prasijotų dalelių masė procentais skaičiuojama pagal 2.1 formulę:

$$f_n = \frac{m_n}{m_d} \cdot 100 \%, \quad (2.1)$$

čia m_n – per vienos frakcijos sietą prasijotų dalelių masė, kg, m_d – sausojo popieriaus gamybos dumblo bendroji masė, kg.

Granulimetrinė analizė buvo atlikta sausojo sijojimo metodu. Parinkti sietai buvo pagal žiauninio trupintuvo smulkinimą. Sijojimo metu buvo naudojami 10 mm; 5 mm, 2,5 mm, 1,25 mm, 0,63 mm sietai.

Prieš atliekant granulimetrinę analizę popieriaus gamybos dumblo žaliava buvo pasverta ir išmaišyta, kad būtų tolygus granulių dalelių pasiskirstymas bendrajame mėginyje. Išmaišius granuliotos terpės mėginį jis buvo sijojamas.



2.1 pav. Popieriaus gamybos dumblo paruoštos žaliavos granulimetrinė sudėtis

Fig. 2.1. Grain size distribution of the prepared raw paper sludge material

2.1 paveiksle pateikta popieriaus gamybos dumblo gamybos granulimetrinė sudėtis. Grafike matyti, kad didžiausią dalį sudaro 5 mm dydžio dalelės (61,5 %), 2,5 mm (31,1 %), kitos dalelės sudaro likusius 7,4 %.

Paruošus žaliavą (pašalinus 10 mm frakciją) taip pat buvo atliktas popieriaus gamybos dumblo piltinio tankio tyrimas. Turimo paruošto popieriaus gamybos dumblo piltinis tankis esant 1–2,5 mm frakcijos dydžiui yra $359,1 \pm 2,6$; 2,5–5 mm – $355,3 \pm 8,7$; 5–10 mm – $327,5 \pm 5,3$. Jis buvo nustatytas pasveriant PGD, kuris buvo supiltas į žinomo tūrio indą.

Mėginiai buvo paruošti dvejomis skirtingomis metodikomis: slėgiant (50 Pa slėgiu) mėginius arba jų neslėgiant jų paruošimo metu. Kai mėginiai buvo neslėgiami, jie buvo ruošiami formose, kurios nebuvo perforuotos, kadangi rišamoji medžiaga mėginyje yra vanduo, džiovavimo metu jis buvo pašalinamas tik per medžiagos dalį, kuri nebuvo dengiama formos. Vandens šalinimas iš mėginio nebuvo tolygus vertinant mėginio vertikaliają ašimi. Taip pat buvo

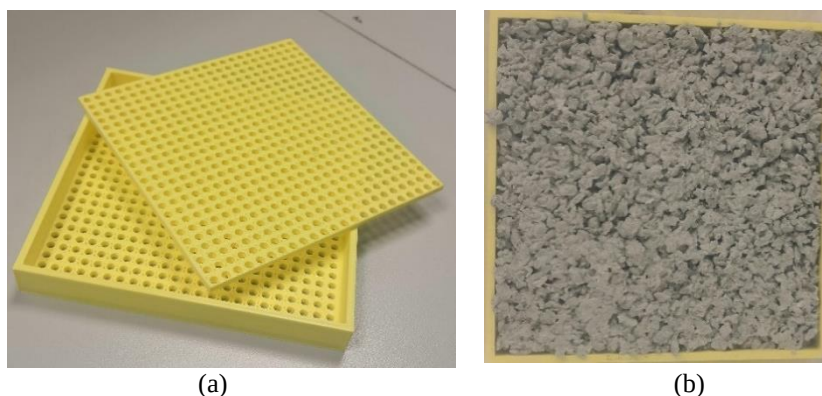
pastebėta, kad pagamintas mėginys buvo sluoksniuotas, nes gesintos kalkės (piltinis tankis 500 kg/m^3) (B-a, n.d.) yra sunkesnės už PGD (piltinis tankis $327,5\text{--}359,1 \text{ kg/m}^3$), todėl nusėdo vienoje mėginio pusėje dėl gravitacinės jėgos.

2.2 lentelė. PGD kompozitinių mėginių sudėtis ir tankis

Table 2.2. Density and composition of PS composite samples

Dalelių dydis, mm	PGD mėginyje, %	Rišklio kiekis, %	Tankis, kg/m^3		
			Gesintos kalkės	Molis	Cementas
1–2,5	50	50	756,0	1073,5	851,1
2,5–5			737,7	1016,9	742,8
5–10			724,4	1148,4	900,0
1–2,5	60	40	717,3	815,5	735,7
2,5–5			712,2	943,4	678,8
5–10			683,6	1030,1	750,0
1–2,5	70	30	678,5	760,9	688,3
2,5–5			646,9	875,3	635,0
5–10			460,2	929,2	690,0
1–2,5	80	20	639,7	626,1	550,5
2,5–5			591,8	812,9	546,3
5–10			612,2	884,9	630,0
1–2,5	90	10	602,0	–	548,3
2,5–5			538,7		492,4
5–10			480,6		570,0

Mėginiai buvo pagaminti naudojant tris skirtingus PGD frakcijų dydžius (5–10 mm, 2,5–5 mm, 1–2,5 mm). Kompozitinės medžiagos buvo sudarytos su skirtingais statybiniais mišiniais: gesintomis kalkėmis (Gamintojas *Natura*, Lenkija), molio miltais (frakcija 0–1,5 mm, gamintojas *Alytaus keramika*) ir cementu (portlandcementis, tipas 42,5R, gamintojas *Akmenės cementas*). Šių medžiagų įvairūs kompozitai yra dažnai naudojami statybos sektoriuje, o patys kompozitai pasižymi gniuždomuoju stipriu (kalcio silikato plyta $16,5\text{--}61,5 \text{ MPa}$ (Brozovsky, 2014), molio plyta $3,5\text{--}40 \text{ MPa}$ (Nowak et al., 2021); betonas – $20\text{--}60 \text{ MPa}$ (Bari et al., 2021; Samya Saha, Mahmud Amanat, n.d.). Kompozitinės plokštės naudojant skirtingus rišiklius buvo pagamintos vadovaujantis ta pačia metodika.



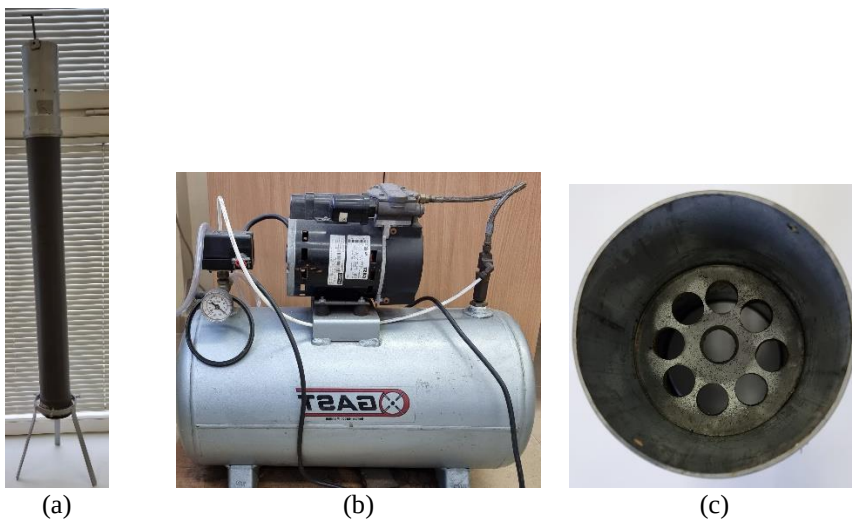
2.2 pav. Perforuota forma mėginiui paruošti (a); ruošiamas mėginys formoje (b)
Fig. 2.2. Perforated form for sample preparation (a); the sample in the form for produce (b)

Tam, kad būtų pasiektas medžiagos akustinį simetriškumas, buvo pagaminta perforuota forma kuris leistų tolygesnį vandens pašalinimą iš medžiagos. Forma pagaminta 3D spausdintuvu (2.2 pav., a), medžiaga – polylakto rūgštis. Šiuo metodu mėginys buvo slegiamas 50 Pa slėgiu, džiovinimo temperatūra 35 °C. Tam, kad būtų užtikrintas tolygus kalkių pasiskirstymas medžiagoje mėginio džiovinimo laikotarpiu, kas 24 val. mėginiai buvo apverčiami. Mėginiai (2.2 pav., b) buvo džiovinami 5–7 paras priklausomai nuo rišiklio ir jo kiekio. Naudojant didesnę rišiklio kiekį džiovinimas truko ilgiau. Pagamintų mėginių storis dėl skirtingų rišiklių savybių nebuvo pastovus, mėginių storis buvo 14 ± 3 mm. Kiekvieno tyrimo metu buvo naudojami 3 mėginiai. Skačiuojamas standartinis nuokrypis nuo vidutinės matavimo vertės. Neapibrėžtis skaičiuojama esant 95 % pasiklivimo intervalui.

2.2. Popieriaus gamybos dumblo statinės orinės varžos nustatymas

Medžiagų orinė varža svarbus parametras nustatant medžiagos garso sugertį. Žinant medžiagos orinę varžą, teoriniais skaičiavimais galima nustatyti medžiagos akustinę varžą ir garso sugerties koeficientą. Medžiagų orinei varžai nustatyti buvo pagamintas tyrimo standas (2.3 pav.). Jį sudaro vamzdis (2.3 pav., a), per kurį teka artimas laminariniam oro srautas, oro kompresorius (2.3 pav., b), mėgininio laikiklis (2.3 pav., c). Oro judėjimo greitis ir slėgių skirtumas matuojami oro greičio matuokliu ir diferenciniu manometru.

Orinei varžai nustatyti taikomas statinio oro srauto metodas (ISO, 1991). Šis metodas paremtas kryptingo oro judėjimo sukuriama oro slėgio skirtumu tarp dviejų atvirų medžiagos paviršių. Stendo vamzdžio ilgis yra 92,5 cm, kad būtų užtikrintas artimas laminariniam (Reinoldso skaičius 160–200 priklausomai nuo aplinkos temperatūros) kryptingas oro srautas. Vamzdžio skersmuo 100 mm. Bandinio laikiklį sudaro 50 % skerspjuvio ploto tolygiai išdėstytos atviros skylės, kurių skersmuo yra 10 mm. Slėgiui sukelti naudojamas oro kompresorius, o slėgio skirtumui matuoti naudojamas diferencinis manometras, kurio tikslumas siekia 0,1 Pa. Oro srauto greitis matuojamas oro srauto greičio matuokliu. Oro srauto greitis įrenginyje turi būti kuo mažesnis siekiant, kad oro srauto greitis nedarytų įtakos susidarancio slėgio skirtumui prieš medžiagą ir už jos. Oro srauto greitis tyrimo metu yra reguliuojamas, oro judėjimo greitis tyrimo metu siekia 0,01 – 0,02 m/s. Tyrimo metodas paremtas ISO 9053-1 „Akustika. Orinės varžos nustatymas. 1 dalis. Statinio oro srauto metodas“ standartu.



2.3 pav. Medžiagų orinei varžai nustatyti naudojamas stendas: (a) – oro srauto vamzdis; (b) – oro kompresorius; (c) – mėginio laikiklis

Fig. 2.3. Laboratory stand for airflow resistivity determination. (a) – airflow tube; (b) – air compressor; (c) – sample holder

Siekiant nustatyti medžiagos statinę orinę varžą, iš pradžių nustatomas oro slėgio skirtumas ΔP ir oro judėjimo greitis v .

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (2.2)$$

čia p_1 – oro slėgis prieš medžiagą, Pa; p_2 – oro slėgis už medžiagos, Pa.

Pirma skaičiuojamas oro pasipriešinimas R (ISO 9053-1):

$$R = \frac{\Delta p}{q}, \quad (2.3)$$

čia q – oro debitas, pratekantis per bandinį, m^3/s ;

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

$$R_s = RA, \quad (2.4)$$

čia A – bandinio skerspjūvio plotas, m^2 .

Medžiagos statinė orinė varža σ apskaičiuojama kaip specifinio oro pasipriešinimo R_s ir bandinio storio d santykis:

$$\sigma = \frac{R_s}{d}, \quad (2.5)$$

čia d – bandinio storis, m .

Statinė orinė varža naudojama teoriniame tyrime medžiagų garso sugerčiai prognozuoti. Šiam tikslui naudojamas fizikinis Delany, Bazley ir Miki modelis.

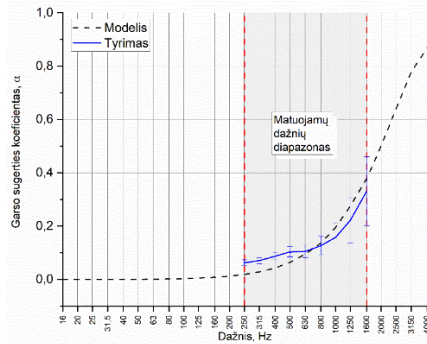
2.3. Garso sugerties priklausomybės nuo akustinės sistemos parametrų teorinio tyrimo metodika

Granuliuotos medžiagos kaip ir mineralinės vatos ar akustiniai porolonai yra laikomos porėtomis ir jų akustinę varžą ir tuomet garso sugertį galima prognozuoti gerai žinomomis Delany, Bazley ir Miki pasiūlytomis lygtimis (Delany, Bazley, 1970; Miki, 1990; Pfretzschnier, Jaime, 2002).

Popieriaus gamybos dumblo plokštės garso sugerties (α) priklausomybės nuo bandinio storio ir oro tarpo dydžio teoriniai tyrimai atliekami remiantis Delany, Bazley ir Miki fizikiniu skaitiniu modeliu (Allard et al., 1989; Delany & Bazley, 1970; Miki, 1990). Šiais tyrimais siekiama papildyti garso sugerties eksperimentinius tyrimus. Gaminant garsą sugeriančias plokštes nepavyko išvengti mėginio storio skirtumų, o garso sugerties matavimo įranga yra ribota dažniniame spektre (250–1600 Hz). Šiame modelyje medžiagos storis laikomas nekintančiu (12 mm), o garso sugerties prognozavimas atliekamas nuo 1 iki 4000 Hz dažnių diapazone (2.4 pav.).

Šie modeliai paremti tuo, kad žinant medžiagos statinę orinę varžą galima nustatyti medžiagos akustinę varžą ir jos garso sugerties koeficientą (Delany & Bazley, 1970). Šiais modeliais prognozuojama normalės bangos kritimo kampo garso sugerties koeficientas. Teorinė popieriaus gamybos dumblo plokščių garso

sugertis nustatoma Delany, Bazley ir Miki modeliu, kuris yra tikslesnis ir veikia platesniame dažnių diapazone (Miki, 1990).



2.4 pav. Teoriniu tyrimu nustatomo dažnių diapazono palyginimas su nustatomu eksperimentiškai

Fig. 2.4. Comparison of frequency range between theoretical and experimental studies

$$Z_c = c_0 \rho_0 \left[1 + 5,5 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} - j 8,43 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} \right], \quad (2.6)$$

čia Z_c – porėtos medžiagos charakteristinė akustinė varža, Pa s/m³, ρ_0 – oro tankis, kg/m³, c_0 – garso greitis ore, m/s, j – kompleksinių skaičių operatorius, f – garso bangos dažnis, Hz, σ – medžiagos orinė varža Pa·s/m².

$$k = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 7,81 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,618} - j 11,41 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,618} \right], \quad (2.7)$$

čia k – kompleksinis bangos numeris medžiagoje, m⁻¹, ω – kampinis dažnis, Rad/s.

Patobulintas Miki modelis tiksliau veikia platesniame dažnių spektre, palyginti su originaliu Delany ir Bazley modeliu, ypač kai yra tenkinama sąlyga $f/\sigma < 0,01$. Garso sklaida daugiasluoksnėse porėtose sistemose, kurios yra apibrėžiamos standžiu paviršiumi, gali būti aprašyta:

$$Z_s = -j \frac{Z_c}{\tan(kd)}, \quad (2.8)$$

čia Z_s – medžiagos akustinė varža ties bandinio riba, Pa·s/m³; d – medžiagos storis, m.

Medžiagos absorbcijos koeficientui skaičiuoti naudojama atspindžio koeficiento ir medžiagos akustinės varžos šetis (Doutres et al. 2010).

$$R = \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0}, \quad (2.9)$$

čia R – garso atspindžio koeficientas.

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

$$\alpha = 1 - |R|^2, \quad (2.10)$$

čia α – medžiagos garso sugerties koeficientas.

Siekiant teoriškai nustatyti optimalią popieriaus gamybos dumblo garso sugertį reikalinga žinoti medžiagos orinę varžą.

2.4. Medžiagos normalės bangos kritimo garso sugerties nustatymo metodika

Garso sugerties nustatymas interferometru yra paremtas standartiniu metodu *Akustika. Garso sugerties koeficiento ir pilnutinės varžos nustatymas interferometrais. 2 dalis. Perdavimo funkcijos metodas (ISO 10534-2)*. Metodas paremtas tuo, kad tyrimo stende sklinda tik plokščios ir atspindėjusios bangos. Stende bangos amplitudė bet kuriuo laiko momentu yra pastovi visose interferometro plokštumose, statmenose fiksuotai kryptčiai, esančios dažnio f ir jos yra harmoninės laike. Tam, kad būtų galima atlikti garso sugerties skaičiavimus, yra daroma prielaida, kad garso bangos interferometre neslopsta.



2.5 pav. Tyrimams naudoto interferometro stendas

Fig. 2.5. Impedance tube measurement set-up used in this study

Siekiant atlikti šiuos tyrimus, buvo suprojektuota ir surinkta interferometro matavimo sistema (2.5 pav), kuri susideda iš kvadratinio skerspjūvio vamzdžio (vidiniai matmenys 10×10 cm), dviejų mikrofonų (1, 2) (tikslumas tapatus 1 klasei), garso šaltinio (3), garso plokštės (4), kompiuterinės programos (perdavimo funkcijos rezultatų įrašymas ir apdorojimas) (5) ir standaus sandariklio (6). Interferometras buvo suprojektuotas remiantis ISO 10534-2 standartu. Interferometro sistemos parametrai pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Pagaminto interferometro parametrai**Table 2.3.** Parameters of the designed impedance tube

Matuojamų dažnių diapazonas, Hz	Plotis ir Aukštis, mm	Atstumas tarp mikrofonų, mm	Atstumas tarp garso šaltinio ir mikrofono, mm	Atstumas tarp mikrofono ir bandinio laikiklio, mm	Bendras vamzdžio ilgis, mm
250–1600	100	90	1200	100	1390

Į interferometro bandinio laikiklį tvirtai įdedama matuojama medžiaga, kuri be oro tarpo uždengta atspindinčiu paviršiumi vertikalojoje ašyje. Kitame vamzdžio gale yra įmontuotas garsiakalbis, kuriuo yra leidžiamas baltasis triukšmas, kurio garso intensyvumas yra tolygus žmogaus girdimuosiuose dažniuose 20 Hz – 20 kHz.

Tyrimo procedūra:

1. Išmatuojama temperatūra interferometre ir nustatomas garso bangos greitis vamzdyje. Temperatūra interferometre tyrimo metu negali kisti daugiau nei 1 °C. Jei nustatytas didesnis pokytis, tyrimo rezultatai laikomi nereprezentatyviais, tyrimą reikia kartoti.
2. Leidžiamo baltojo garso slėgio lygis interferometre tyrimo metu turi būti 10 dB didesnis už foninį.
3. Programinės įrangos ir matematinėmis fizikinėmis formulėmis skaičiuojami garso sugerties ir atspindžio koeficientai.

Nustačius garso slėgį abiem mikrofonais skaičiuojama garso perdavimo funkcija tarp mikrofonų pagal 2.11 formulę:

$$H_{12} = \frac{p_2(f)}{p_1(f)}, \quad (2.11)$$

čia p_2 – antruoju mikrofonu užfiksuotas slėgis; p_1 – pirmuoju mikrofonu užfiksuotas slėgis; f – dažnis.

Siekiant apskaičiuoti krintančios ir atsispindėjusios bangos bei atspindžio koeficientą reikalingas garso bangos numeris ore, kuris apskaičiuojamas pagal 2.12 formulę:

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c_0}, \quad (2.12)$$

čia k_0 – bangos numeris ore, m^{-1} ; f – dažnis, Hz; c_0 – garso greitis ore, m/s.

$$H_I = e^{-jk_0 s}, \quad (2.13)$$

čia: H_I – krintančios bangos perdavimo funkcija; s – atstumas tarp mikrofonų ($s = 0,09 \text{ m}$)

$$H_R = e^{jk_0 s}, \quad (2.14)$$

čia H_R – atspindėjusios bangos perdavimo funkcija; s – atstumas tarp mikrofonų.

Žinant atspindėjusios ir krintančios bangos perdavimo funkcijas, garso atspindžio koeficientas R skaičiuojamas pagal formulę:

$$R = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1}, \quad (2.15)$$

čia H_I – krintančios bangos perdavimo funkcija; H_R – atspindėjusios bangos perdavimo funkcija; k_0 – bangos numeris m^{-1} ; x_1 – atstumas tarp mikrofono Nr. 1 ir mėginio ($x_1 = 0,1 \text{ m}$).

Medžiagos sugerties koeficientas yra atvirkščias dydis atspindžio koeficientui. Todėl medžiagos sugerties koeficientas plokščioms bangoms nustatomas pagal formulę:

$$\alpha = 1 - |R|^2, \quad (2.16)$$

čia α – medžiagos garso sugerties koeficientas

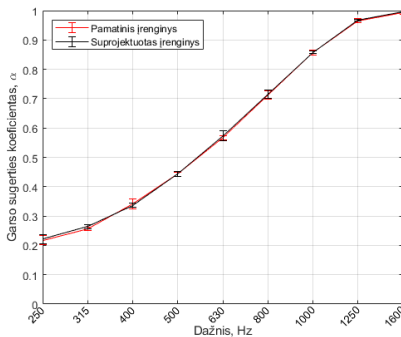
Tam, kad būtų galima paprastai palyginti skirtingas medžiagas, yra naudojamas svertinis garso sugerties koeficientas (α_w). Projektuojant matavimo sistemą buvo orientuojamasi į žemesnių oktavos dažnių matavimą, nes ieškant medžiagos pritaikomumo svarbiau yra sugerti žemesnių dažnių bangas. Žemesnių dažnių garso bangos yra sunkiau sugeriamos dėl jų didesnio bangos ilgio. Šiame disertaciniame darbe įvedamas $\alpha_{vid.}$ rodiklis:

$$\alpha_{vid.} = \frac{\sum \alpha_n}{n}, \quad (2.17)$$

čia $\alpha_{vid.}$ – vidutinis garso sugerties koeficientas; α_n – garso sugerties koeficientas n -tojoje oktavos dažnių juostoje; n – visuminis oktavos dažnių juostų skaičius.

Disertacijos tikslui ir uždaviniams įgyvendinti buvo suprojektuotas ir pagamintas interferometras. Siekiant nustatyti, ar suprojektuotas interferometras veikia tinkamai, buvo atlikti palyginamieji tyrimai. Etaloniniu interferometru yra laikomas Valensijos politechnikos universitete stažuotės metu naudotas interferometras. Palyginamiesiems tyrimams atlikti buvo naudojamas tas pats mėginys (2.7 pav., b), kuris buvo ištirtas abiem interferometrais.

Rezultatams vertinti buvo atliktas statistinis veiklos patikimumo skaičiavimas. Šiuo atveju kaip pamatinės matavimo vertės buvo pasirinktos kitoje laboratorijoje atliktų tyrimų rezultatų vertės. 2.6 pav., a, pateiktos palyginamosios garso sugerties kreivės. Grafike matyti, kad žemesniuose dažniuose 300–600 Hz kreivių neatitikimai yra didesni (siekia 0,06), tačiau aukštesniuose dažniuose nuo 700 iki 1600 Hz garso sugerties kreivės sutampa.



(a)



(b)

2.6 pav. Interferometro patikrinimo rezultatai: (a) – palyginamosios garso sugerties kreivės; (b) – tiriamasis porolono mėginys

Fig. 2.6. Test results of impedance tube system: (a) – comparative sound absorption curves, (b) – test sample

Statistinis rezultatų palyginimas atliekamas pagal 2.18 formulę, kuri detaliai yra aprašoma ISO/IEC 17043 standarte „Atitikties vertinimas. Bendrieji tyrimų kokybės tikrinimo reikalavimai“ (ISO, 2016):

$$E_n = \frac{x_{mat} - X_{ref}}{\sqrt{U_{mat}^2 + U_{ref}^2}}, \quad (2.18)$$

čia x_{mat} – tyrimų rezultatai, gauti suprojektuotu įrenginiu; X_{ref} – tyrimų rezultatai, gauti kitoje laboratorijoje; U_{ref}^2 – tyrimų rezultatų standartinė neapibrėžtis, gauta kitoje laboratorijoje; U_{mat}^2 – standartinė neapibrėžtis, nustatyta suprojektuotame įrenginyje.

Papildomai taip pat atliekamas procentinio skirtumo skaičiavimas tarp laboratorinių matavimų rezultatų :

$$D_{\%} = \frac{x_{mat} - X_{ref}}{X_{ref}} \cdot 100 \%. \quad (2.19)$$

Jei statistinio rezultatų palyginimo vertės E_n kinta nuo -1 iki 1 , tuomet tarp-laboratoriniai normalės bangos kritimo kampo garso sugerties rezultatai vertinami kaip tinkami. Tai reikštų, jei E_n vertės matuojamame dažnių spektre kinta nuo -1 iki 1 , tuomet pagamintas interferometras matuoja tinkamai. Procentiniam rezultatų skirtumui pagal standartą reikalavimų nėra. E_n ir $D_{\%}$ rodikliai buvo skaičiuojami suprojektuoto įrenginio matuojamų $1/3$ oktavos dažnių juostų diapazone. Kiekvienai centrinei $1/3$ oktavos dažnių juostos vertei buvo nustatomi palyginamieji rodikliai, pateikiami 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Statistinių palyginamųjų rodiklių rezultatai

Table 2.4. Results of statistical parameters of comparison

Rodiklis	Centrinės 1/3 oktavos dažnių juostos vertės, Hz								
	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
E_n	–0,14	–0,91	0,28	–0,02	–0,41	–0,20	–0,18	–0,24	–0,25
$D\%$	1,4	3,2	–1,5	0,05	1,3	0,58	0,19	0,22	0,22

Pagal 2.4 lentelėje pateiktus duomenis didžiausias E_n rezultatas yra –0,91 esant 315 Hz dažniui. Kitose oktavos dažnių juostose nuokrypis yra mažesnis ir kinta nuo –0,41 iki 0,28. Procentinis matavimų skirtumas siekia 3,2 % taip pat 315 Hz oktavos dažnių juostoje. Atlikus statistinius skaičiavimus galima teigti, kad suprojektuotas ir pagamintas įrenginys matuoja tinkamai.

Atlikus n matavimo pakartojimų yra skaičiuojamas rezultatų aritmetinis vidurkis (Butkus et al., 2005):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.20)$$

čia $\bar{x}$ – rezultato vidurkis; x_i – matavimo vertė i -tojoje oktavos dažnių juostoje; n – matavimų skaičius ($n = 50$).

Standartinis nuokrypis skaičiuojamas pagal formulę:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.21)$$

čia s – standartinis nuokrypis;

Tyrimų neapibrėžčiai nustatyti skaičiuojamas standartinis nuokrypis ir padauginamas iš Stjudento kriterijaus. Kadangi kiekvieno matavimo metu buvo atliekama 50 pakartojimų (periodinių matavimų), todėl Stjudento kriterijus esant 95 % pasiklivimo tikimybei yra lygus 2,0 (Butkus et al., 2005).

$$\beta = s \cdot 2,0, \quad (2.22)$$

čia β – tyrimų neapibrėžtis.

Neapibrėžtis skaičiuojama kiekvienai išmatuotai oktavos dažnių juostai atskirai.

2.5. Reverberacijos trukmės skaitinio modeliavimo patalpoje metodika

Šiame poskyryje pateikta reverberacijos trukmės nustatymo realiose patalpose modeliavimo metodika. Šis tyrimas yra skirtas patikrinti PGD plokščių efektyvumui patalpose, kuriose reikia mažinti reverberacijos trukmę. Šiuo modeliu tikrinamas galimas PGD kompozitinių plokščių pritaikomumas realiomis sąlygomis, neiekvojant kaštų gaminant didelio ploto mėginius.

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 rodytų, 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 garsą 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 oru taip pat praranda energiją. Tokiu atveju reverberacijos trukmė skaičiuojama pagal 2.23 formulę:

$$R_{T,60} = 0,163 \frac{V}{(S+4\alpha_{oro}V)}. \quad (2.23)$$

Modeliavimo įvesties pagrindiniai parametrai pateikti 2.6 ir 2.7 lentelėse. Modeliui reikalingi pagrindiniai garso sklaidai reikiami parametrai – garso greitis, oro tankis, patalpos tūris, garso šaltinio ir mikrofono pozicijos, iš šaltinio paleidžiamų bangų skaičius.

Vertinant patalpų garso kokybę yra naudojamas garso perdavimo indeksas (*STI*). Šiuo rodikliu objektyviai vertinama garso kokybė, garsinės informacijos

aiškumas patalpoje. Šiame darbe *Odeon* modeliavimo programa nustatomas kalbos perdavimo indekso pokytis patalpoje, naudojant porėtus reguliuojamus popieriaus gamybos dumblo absorberius.

2.5 lentelė. Patalpos ir akustinių sąlygų parametrai, įtraukiami į modelį

Table 2.5. Input parameters of the room and acoustic properties.

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 – semisferinis)
Patalpos tūris, V	189,75 m ³

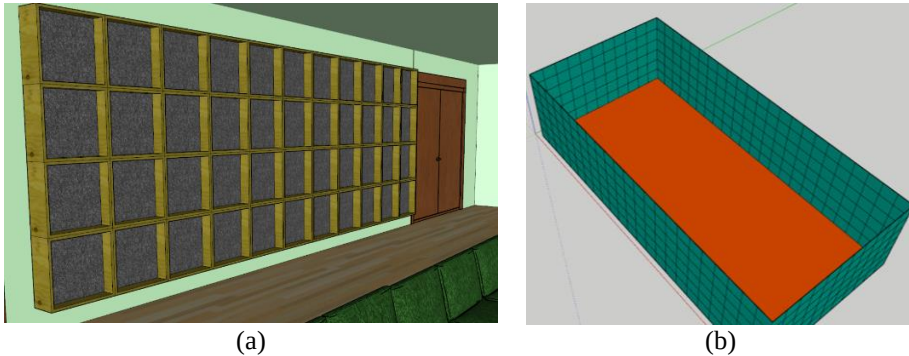
Medžiagų garso sugertis yra parenkama iš programos katalogo (mūro sienos) ir iš eksperimentinių tyrimų rezultatų (PGD plokščių garso sugertis).

2.6 lentelė. Modelio įvesties garso sugerties duomenys

Table 2.6. Model input parameters of the sound absorption of the surfaces

Elementas	1/3 oktavos dažnių juosta, Hz						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Sienos, lubos, grindys	0,1	0,07	0,05	0,04	0,04	0,05	0,08
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	–	–	–

Atliekant modeliavimą yra išsikelta užduotis nustatyti sukurtų garso absorberių (2.7 pav, a.) 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.



2.7 pav. Stačiakampio gretasienio formos auditorija: (a) – reguliuojamų PGD absorberių vizualizacija; (b) – patalpos modelis

Fig. 2.7. Auditorium in the shape of rectangular parallelepiped, (a) – visualisation of the PS absorbers; (b) – model of the room

Pasirinkta patalpa yra stačiakampio gretasienio formos (2.7 pav., b), ji 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).

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Pasiūlyta popieriaus gamybos dumblo mėginių gaminimo metodika perforuotose formose medžiagos akustinį simetriškumą vidutiniškai padidino 71 %.
2. Sudaryta medžiagų normalinio bangos kritimo kampo garso sugerties nustatymo metodika, kuri taikoma popieriaus gamybos dumblo kompozitinių plokščių garso sugerčiai nustatyti. Vertinama popieriaus gamybos dumblo kiekio, dalelių dydžio ir rišiklio įtaka garso sugerčiai (α).
3. Suprojektuotas ir pagamintas matavimo stendas ir sudaryta medžiagos statinės orinės varžos nustatymo metodika, kuri yra paremta ISO 9053 standartu. Šiuo metodu nustatoma birių popieriaus gamybos dumblo granulių ir iš jų pagamintų kompozitinių popieriaus gamybos dumblo plokščių orinė varža.
4. Sudaryta teorinio tyrimo metodika, paremta fizikiniu skaitiniu Delany, Bazley ir Miki modeliu. Šiuo modeliu teoriškai nustatoma normalės

bangos kritimo kampo garso sugertis. Teoriniame tyrime yra naudojami eksperimentiniai medžiagų statinės orinės varžos rezultatai.

5. Suprojektuotas ir pagamintas matavimo stendas – interferometras, skirtas medžiagų akustinėms savybėms nustatyti. Šiuo tyrimu siekiama eksperimentiškai nustatyti popieriaus gamybos dumblo dalelių kiekio, dydžio ir skirtingų rišiklių įtaką kompozitinių medžiagų garso sugerčiai.
6. Sudaryta aidėjimo trukmės patalpose modeliavimo metodika, naudojant *Odeon* programinę įrangą. Naudojant modelį tiriamas reguliuojamų porėtų garso absorberių efektyvumas mažinant reverberacijos trukmę patalpoje.

Popieriaus gamybos dumblo akustinių ir neakustinių savybių charakterizavimo ir reverberacijos trukmės skaitinio modeliavimo rezultatai ir jų analizė

Šių tyrimų tikslas – pagaminti ir ištirti garsą sugeriančią plokštę popieriaus gamybos dumblo pagrindu, suprojektuoti ir teoriškai patikrinti garso absorberį. Atlikti eksperimentiniai kompozitinių medžiagų iš popieriaus gamybos dumblo eksperimentiniai orinės varžos, garso sugerties tyrimai. Taip pat buvo atlikti teoriniai garso sugerties tyrimai, siekiant papildyti eksperimentinių garso sugerties tyrimų duomenis. Tyrimuose išanalizuotos popieriaus gamybos dumblo pagrindu pagamintos medžiagos su skirtingais rišikliais, keičiant jų kiekį kompozite, nustatyta rišiklio kiekio įtaka garso sugerčiai. Remiantis gautais rezultatais, buvo sukurtas garso absorberis, į kurį yra integruota popieriaus gamybos dumblo kompozitinė plokštė. Absorberio efektyvumas reverberacijos trukmei mažinti buvo nustatytas skaitinio modeliavimo metodu, naudojant *Odeon* programinę įrangą.

Šiame skyriuje pateikiami eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatai. Skyriaus tematika paskelbti septyni autoriaus moksliniai straipsniai (Astrauskas, Januševičius et al., 2021; Astrauskas, Picó et al., 2021; Astrauskas & Grubliauskas, 2018, 2019, 2020a, 2020b, 2021)

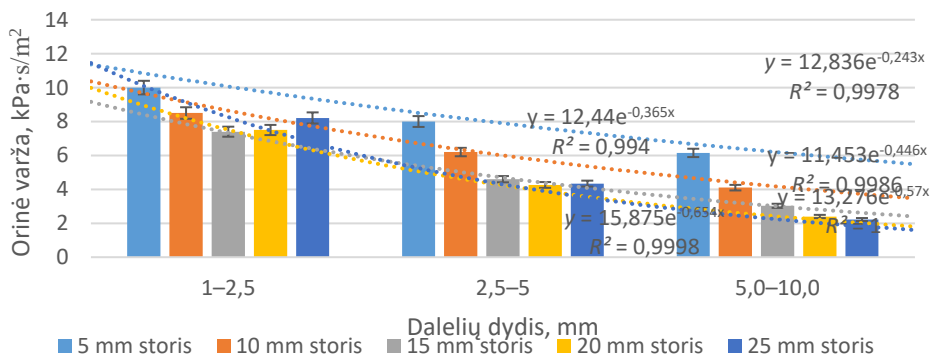
Gautas Lietuvos Respublikos patentas, patent numeris LT 6879 (Astrauskas & Grubliauskas, 2022).

3.1. Popieriaus gamybos dumblo statinės orinės varžos nustatymo eksperimentinių tyrimų rezultatai

Šiame poskyryje pateikiami eksperimentiniai oro varžos nustatymo rezultatai. Pirmiausia atlikti skirtingų frakcijų žaliavos orinės varžos tyrimai, siekiant išsiaiškinti, ar popieriaus gamybos dumbblas gali būti naudojamas kaip granuliuota garsą sugerianti medžiaga.

3.1.1. Birus popieriaus gamybos dumblo statinė orinė varža

Šioje tyrimo dalyje pasirinktos skirtingos popieriaus gamybos dumblo frakcijos (5–10 mm, 2,5–5 mm, 1–2,5 mm), reguliuojant medžiagos storį (5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm). Šie tyrimai atlikti su biriomis PGD granulėmis.

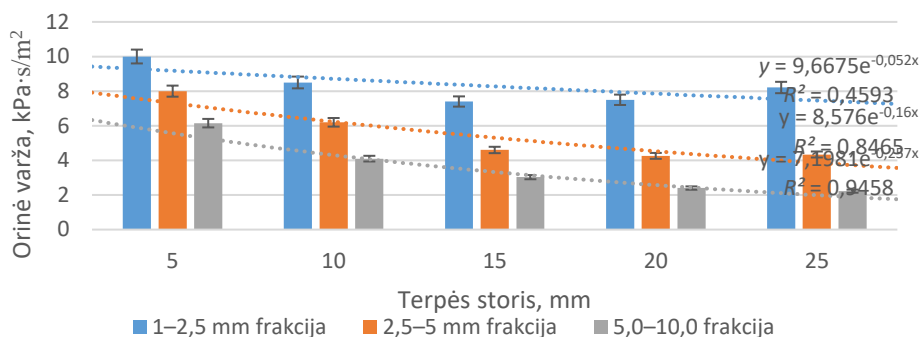


3.1 pav. Orinės varžos priklausomybė nuo PGD granulių dalelių dydžio

Fig. 3.1. PS grain size influence on airflow resistivity

3.1 paveiksle pateikta skirtingų storį PGD granuliuotos terpės orinės varžos priklausomybė nuo frakcijos dydžio. Iš grafikų matyti, kad visais atvejais (esant skirtingiems storiams) orinė varža mažėja didėjant frakcijos dydžiui. Nustatyta, kad orinės varžos mažėjimas didinant PGD dalelių dydį yra eksponentinis. Visų

storių atvejais nustatyta stipri priklausomybė tarp šių parametų. Determinacijos koeficientas (R^2) kinta nuo 0,994 iki 1,0.



3.2 pav. PGD statinės orinės varžos priklausomybė nuo storio

Fig. 3.2. Static airflow dependency on the thickness of the PS

3.2 paveiksle pateikta statinės orinės varžos priklausomybė nuo granuliuotos terpės storio. Iš grafikų matyti, kad statinė orinė varža mažėja didinant terpės storį. Taip yra todėl, kad medžiagos aerodinaminis pasipriešinimas didėja neproporcingai medžiagos storiui, todėl statinės orinės varžos reikšmės mažėja didinant PGD granuliuotos terpės storį. Nustatyta, kad didinant terpės storį statinė orinė varža mažėja pagal logaritminę priklausomybę, tačiau lygties determinacijos koeficientas

rodo silpną priklausomybę palyginti su priklausomybe nuo dalelių dydžio. Skirtingų frakcijos dydžio determinacijos koeficientai varijuoja nuo 0,46 iki 0,95.

3.1.1. Popieriaus gamybos dumblo plokščių statinė orinė varža

Taip pat buvo atlikti PGD kompozitinių plokščių statinės orinės varžos tyrimai. 3.1 lentelėje matyti, kad didinant PGD kiekį kompozite statinė orinė varža didėja. Tai galima sieti su medžiagos tankiu, nes didinant rišiklio kiekį medžiagos tankis didėja, taip pat tai pastebima ir statinės orinės varžos medžiagos savybės atveju.

3.1 lentelėje pateikiama skirtingų kompozitinių plokščių naudojant gesintų kalkių rišiklį statinės orinės varžos tyrimų rezultatai. Tyrimais nustatyta, kad statinė orinė varža mažėja, mažinant rišiklio kiekį kompozite. Vertinant vienodos frakcijos kompozitų orinę varžą, nustatyta, kad didžiausia statinė orinė varža yra kompozituose, kuriuose yra 50 % gesintų kalkių, esant 10 % – mažiausia. Statinės

orinės varžos priklausomybė nuo frakcijos dydžio nebuvo nustatyta. Statinė orinė varža, didinant PGD kiekį 10 %, vidutiniškai mažėja 24 %.

3.1 lentelė. Skirtingų PGD kompozitų naudojant gesintų kalkių rišiklį statinės orinės varžos nustatymo rezultatai

Table 3.1. Results of the airflow resistivity of the different PS composites with the slaked lime as binder

Rišiklis	PGD kiekis kompozite, %	1,0–2,5 mm frakcija, $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	2,5–5 mm frakcija, $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	5–10 mm frakcija, $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
Gesintos kalkės	50	175,6±5,8	161,0±2,0	379,8±3,6
	60	162,3±3,6	120,3±3,8	215,3±9,3
	70	101,4±4,0	90,1±0,6	172,7±3,8
	80	81,0±2,4	60,3±0,9	130,5±9,4
	90	49,6±3,2	57,3±1,8	115,8±0,8

3.2 lentelė. Skirtingų PGD kompozitų naudojant molio rišiklį statinės orinės varžos nustatymo rezultatai

Table 3.2. Results of the static airflow resistivity of the different PS composites with the clay as a binder

Rišiklis	PGD kiekis kompozite, %	1,0–2,5 mm frakcija, $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	2,5–5 mm frakcija, $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	5–10 mm frakcija, $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
Molis	50	181,3±5,9	278,1±5,8	120,4±4,1
	60	162,2±3,5	235,6±8,2	95,2±3,3
	70	83,4±4,7	98,7±3,4	83,4±3,5
	80	80,7±4,0	82,6±3,6	74,5±2,6

3.2 lentelėje pateikiami skirtingų kompozitinių plokščių su molio rišikliu statinės orinės varžos tyrimų rezultatai. Tyrimais nustatyta, kai naudojamas molio rišiklis, statinė orinė varža mažėja, mažinant rišiklio kiekį kompozite. Vertinant vienodos frakcijos kompozitų orinę varžą, nustatyta, kad didžiausia statinė orinė varža yra kompozituose, kuriuose yra 50 % molio, esant 20 % – mažiausia. Kaip ir gesintų kalkių atveju, statinės orinės varžos priklausomybė nuo dalelių frakcijos dydžio nebuvo nustatyta. Statinė orinė varža didinant PGD kiekį 10 % vidutiniškai mažėja 22 %.

3.3 lentelėje pateikiami skirtingų kompozitinių plokščių su cemento rišikliu statinės orinės varžos tyrimų rezultatai. Tyrimais nustatyta, kai naudojamas molio rišiklis, statinė orinė varža mažėja, mažinant rišiklio kiekį kompozite. Vertinant vienodos frakcijos kompozitų orinę varžą, nustatyta, kad didžiausia statinė orinė varža yra kompozituose, kuriuose yra 50 % cemento, esant 10 % – mažiausia.

3.3 lentelė. Skirtingų PGD kompozitų naudojant cemento rišiklį statinės orinės varžos nustatymo rezultatai

Table 3.3. Results of the static airflow resistivity of the different PS composites with the cement as a binder

Rišiklis	PGD kiekis kompozite, %	1,0–2,5 mm frakcija, kPa·s/m ²	2,5–5 mm frakcija, kPa·s/m ²	5–10 mm frakcija, kPa·s/m ²
Cementas	50	137,5±5,4	109,5±5,2	163,5±8,2
	60	122,3±5,0	105,0±5,2	153,4±5,6
	70	71,5±2,8	96,2±4,1	139,4±4,6
	80	64,2±3,3	85,8±3,3	127,5±4,3
	90	58,6±1,9	81,0±2,8	114,6±3,3

Kaip ir gesintų kalkių ir molio atvejais statinės orinės varžos priklausomybė nuo dalelių frakcijos dydžio nebuvo nustatyta. Statinė orinė varža didinant PGD kiekį 10 % vidutiniškai mažėja 12 %.

3.2. Garso sugerties priklausomybės nuo akustinės sistemos parametrų teorinio tyrimo rezultatai

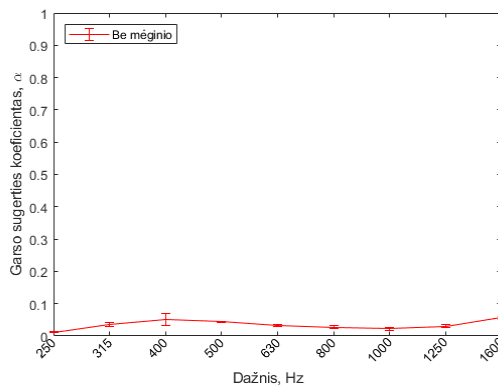
Popieriaus gamybos dumblo kompozitinių plokščių garso sugerties teoriniai tyrimai buvo atlikti pagal Delany, Bazley ir Miki modelį. Šiuo modeliu galima prognozuoti normalinio bangos kritimo kampo garso sugerties koeficientą.

3.2.1. Teorinio modelio palyginimas su eksperimentinių tyrimų rezultatais

Šioje poskyrio dalyje pateikiami teorinių tyrimų verifikavimo remiantis eksperimentiniais tyrimais rezultatai. Pagamintų plokščių storis daugeliu atvejų turėjo nuokrypį nuo siekiamojo storio.

Todėl lyginant teorinį modelį su eksperimentiniais rezultatais modelyje buvo keičiami statinės orinės varžos ir plokštės storio parametrai.

Atlikus PGD ir gesintų kalkių kompozitų teorinių (A priedas, A.1 pav.) ir matavimų rezultatų palyginimą beveik visais atvejais buvo nustatytas neatitikimas žemų dažnių diapazone nuo 250–630 Hz. Vidutiniškai šiame dažnių diapazone neatitikimas siekė 32 %. 800–1600 Hz oktavos dažnių diapazone neatitikimas siekė 10 %. Šis neatitikimas yra todėl, kad interferometre veikia ir oro garso sugertis, modelyje ši dedamoji nėra vertinama. Pažymėtina, kad matuojant interferometru, nors ir neįdėjus mėginio, garso sugerties nulinės vertės nėra nustatomos (3.3 pav.). Tai yra nulemiama oro garso sugerties. Taip pat šiame modelyje nėra vertinami kiti medžiagos neakustiniai parametrai, todėl teorinio modelio tikslumas žemesniuose dažniuose prastėja (Taraldsen, 2005).



3.3 pav. Garso sugertis nesant mėginio interferometre (eksperimentas)

Fig. 3.3. Sound absorption results without sample in the impedance tube (experimental data)

Norint pagrįsti prielaidą dėl oro garso sugerties, buvo atlikti papildomi eksperimentiniai tyrimai, juos atliekant interferometre buvo neįdedama garsą sugerianti medžiaga. 3.3 paveiksle matyti, kad atliekant tyrimus oro klampis daro įtaką garso sugėčiai ypač oktavos dažnių juostose nuo 315 iki 500 Hz. Eksperimentiškai nustatyta, kad garso sugerties koeficientas dėl oro klampės kito nuo 0,01 iki 0,057. Atliekant teorinį tyrimą tokiu atveju gaunamas 0 visose oktavos dažnių juostose.

Atlikus PGD ir molio kompozitų teorinių (A priedas, A.2 pav.) ir matavimų rezultatų palyginimą, taip pat kaip ir lyginant su gesintų kalkių kompozitais, buvo nustatytas neatitikimas žemų dažnių diapazone nuo 250–630 Hz. Teorinio modelio ir matavimo neatitiktis šiame dažnių diapazone siekė 51 %, 800–1600 Hz diapazone nustatytas 10 % neatitikimas.

Atlikus PGD ir cementų kompozitų teorinių (A priedas, A.3 pav.) ir matavimų rezultatų palyginimą buvo taip pat buvo nustatyti skirtumai tarp teorinio ir išmatuoto garso sugerties koeficiento. 250–630 Hz dažnių diapazone neatitiktis siekė 40 %, o aukštesnių dažnių diapazone 6 %. Šis neatitikimas yra todėl, kad interferometre veikia ir oro garso sugertis, modelyje ši dedamoji nėra vertinama.

Matuojant cemento kompozitus 250–630 Hz dažniuose garso sugertis buvo didesnė palyginti su teorine. Molio ir cemento PGD kompozitinių plokščių atveju teorinis ir eksperimentinis rezultatai skyrėsi labiau palyginti su gesintų kalkių kompozitinėmis plokštėmis dėl didesnio jų tankio. Medžiagos tamprumas ir medžiagos rezonansinis dažnis priklauso nuo medžiagos masės, medžiagos tamprumo parametrai šiuo modeliu nėra vertinami. Taip pat šiuo modeliu nėra vertinamas medžiagų poringumas ir lenktumas, todėl teorinio modelio tikslumas žemesniuose dažniuose yra prastesnis (Taraldsen, 2005).

Naudojantis teoriniu modeliu galima gan tiksliai nustatyti PGD kompozitinių plokščių garso sugerties koeficientus aukštesnėse nei 630 Hz oktavos dažnių juostose (5–10 % tikslumu). Delany, Bazley ir Miki modelis pakankamai tiksliai parodo garso sugerties tendencijas aukštesnių dažnių diapazone.

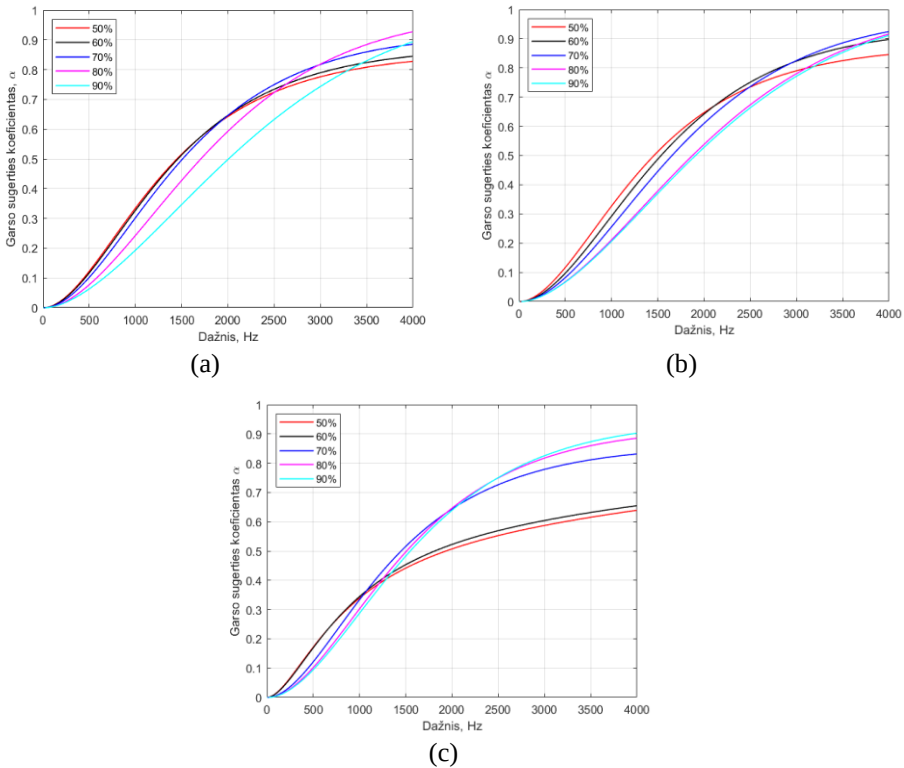
3.2.2. Garso sugerties vertinimas esant vienodam medžiagos storiui

Pagamintų plokščių storis daugeliu atvejų turėjo nuokrypį nuo siekiamojo storio (12 mm). Todėl lyginant teorinį modelį su eksperimentiniais rezultatais modelyje kinta statinės orinės varžos ir plokštės storio parametrai.

Atlikus modelio verifikavimą teoriniu metodu nustatoma garso sugertis esant vienodo storio plokštėms. Nors eksperimentiniais tyrimais buvo siekiama išlaikyti plokštės storį kaip nekintantį dydį, dėl skirtingo plokščių susitraukimo gaminant mėginį gamybos metu nepavyko išvengti paklaidų. Todėl teoriniais skaičiavimais nustatyta garso sugertis esant vienodam plokščių storiui. Taip pat teoriniais tyrimais galima išplėsti dažnių diapazoną atliekant tyrimą nuo 0 iki 4000 Hz. Prognozuojant rezultatus platesniame dažnių spektre galima matyti daugiau informacijos, susijusios su medžiaga, o tai leidžia geriau išanalizuoti ir pritaikyti kuriamus kompozitus. Teoriniam tyrimui parenkamas storis yra 12 mm.

3.4 paveiksle pateikiami kalkių ir PGD kompozitinių plokščių teorinio prognozavimo rezultatai. Rezultatams prognozuoti buvo naudojami eksperimentiniai statinės orinės varžos rezultatai. Panašiai kaip ir garso sugerties eksperimentiniuose rezultatuose žemuose ir vidutiniuose (0–1600 Hz) dažniuose garso sugertis didesnė naudojant didesnę rišiklio kiekį, tačiau aukštesniuose dažniuose pastebima atvirkštinė priklausomybė. Orinei varžai mažėjant (taip pat mažėjant rišiklio kiekiui kompozite) garso sugertis didėja. Priklausomai nuo

statinės orinės varžos skirtumų garso sugertis suvienodėja, esant 1–3 kHz garso dažniams

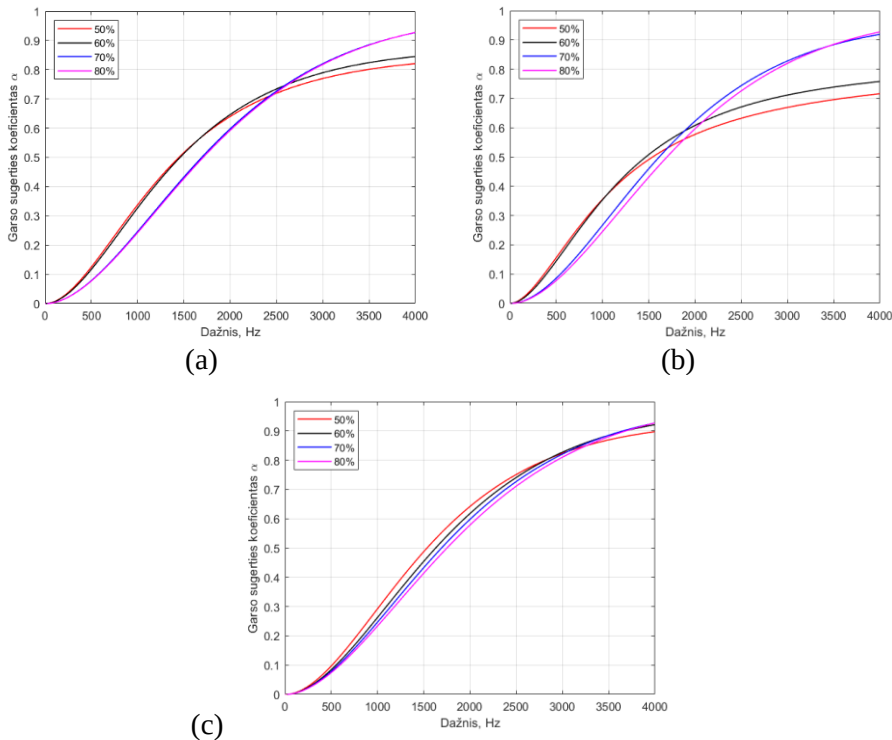


3.4 pav. Kalkių ir PGD kompozitinių plokščių garso sugerties teorinis prognozavimas:
(a) – 1–2,5 mm; (b) – 2,5–5 mm; (c) – 5–10 mm

Fig. 3.4. Theoretical estimation of PS and slaked lime panels sound absorption.
(a) – 1–2,5 mm; (b) – 2,5–5 mm; (c) – 5–10 mm

3.5 paveiksle pateikiami molio ir PGD kompozitinių plokščių teorinio prognozavimo rezultatai. Dažnių diapazone nuo 1 iki 1600 Hz, naudojant didesnę rišiklio kiekį (50–60 % PGD), gauta teorinė garso sugertis didesnė (α siekia iki 0,65), palyginti su kompozitais, turinčiais mažiau rišiklio (70–80 % PGD) (α siekia iki 0,45). Naudojant mažiau rišiklio (70–80 % PGD) – garso sugertis didesnė, esant aukštesniems dažniams (1600–4000 Hz), garso sugerties koeficientas siekia iki 0,93. Šiuos garso sugerties skirtumus lemia statinė orinė varža. Didinant statinės orinės varžos parametro dydį garso sugerties vertės yra didesnės žemesniuose dažniuose, palyginti su medžiaga, kuri yra mažesnės statinės orinės varžos. Atvirkštinė priklausomybė pastebima esant aukštesniems

dažniams. Priklausomai nuo statinės orinės varžos skirtumų kompozitinėse medžiagose, garso sugertis suvienodėja 1500–3000 Hz garso dažnių diapazone.



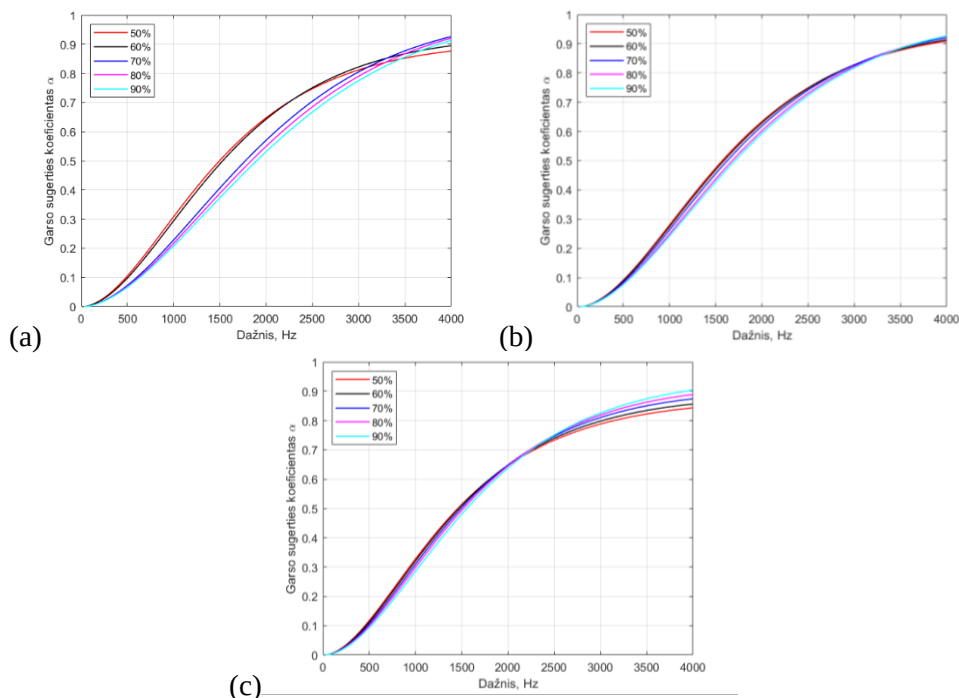
3.5 pav. Molio ir PGD kompozitinių plokščių garso sugerties teorinis prognozavimas:

(a) – 1–2,5 mm; (b) – 2,5–5 mm; (c) – 5–10 mm

Fig. 3.5. Theoretical estimation of PS and clay panels sound absorption.

(a) – 1–2,5 mm; (b) – 2,5–5 mm; (c) – 5–10 mm

3.6 paveiksle pateikti cemento ir PGD kompozitinių plokščių teorinio tyrimo rezultatai. Pastebėta, kad naudojant cemento rišiklį teoriškai nustatomos garso sugerties vertės keičiant rišiklio kiekį kinta mažiau. Naudojant PGD dalelių dydį 2,5–5 ir 5–10 mm pastebimas garso sugerties kitimas tik iki 0,06 (esant 4000 Hz dažnių). Naudojant mažesnes daleles garso sugerties skirtumas didesnis (skirtumas iki 0,1). Tai lemia sąlygiškai nedidelis statinės orinės varžos kitimas keičiant rišiklio kiekį.



3.6 pav. Cemento ir PGD kompozitinių plokščių garso sugerties teorinis prognozavimas:
(a) – 1–2,5 mm; (b) – 2,5–5 mm; (c) – 5–10 mm

Fig. 3.6. Theoretical estimation of PS and cement panels sound absorption.

(a) – 1–2,5 mm; (b) – 2,5–5 mm; (c) – 5–10 mm

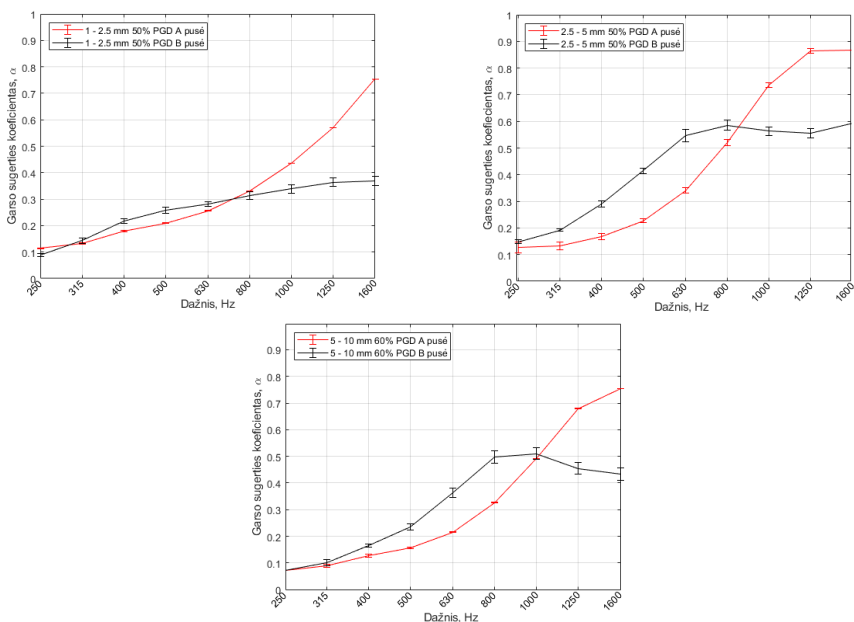
Atlikus visų trijų tiriamų kompozitinių medžiagų teorinio tyrimo analizę buvo nustatyta, kad esant didesnei medžiagos orinei varžai garso sugertis didėja žemesniuose dažniuose, esant mažesnei – aukštuose. Siekiant padidinti garso sugertį 250–500 Hz dažnių diapazone projektuojant medžiagas reiktų siekti didesnės statinės orinės varžos. Šiame dažnių ruože aukščiausi rezultatai buvo pasiekti naudojant gesintų kalkių ir 5–10 mm PGD daleles ($\alpha = 0,09$).

3.3. Medžiagos garso sugerties nustatymo rezultatai

Šiame poskyryje pateikiami eksperimentinių garso sugerties tyrimų, atliktų interferometru, rezultatai. Šis poskyris padalintas į tris pagrindines dalis: Rezultatų palyginimas tarp dviejų skirtingų mėginio pusių, garso sugerties priklausomybė nuo dalelių dydžio, garso sugerties priklausomybė nuo popieriaus dumblo koncentracijos kompozite.

3.3.1. Mėginių akustinio simetriškumo tyrimai

Šiame poskyryje pateikiamas garso sugerties palyginamas tarp skirtingų mėginio pusių vertikaliąja ašimi, t. y. akustinio simetriškumo tyrimai. Medžiaga laikoma akustiškai simetriška, kai matuojant mėginį iš skirtingų pusių vertikaliąja ašimi gaunami vienodi rezultatai. Skirtingos mėginio pusės įvardintos kaip A ir B pusė. 3.7 paveiksle pateikti rezultatai mėginių, kurie buvo pagaminti neslegiant ir nevertinant.



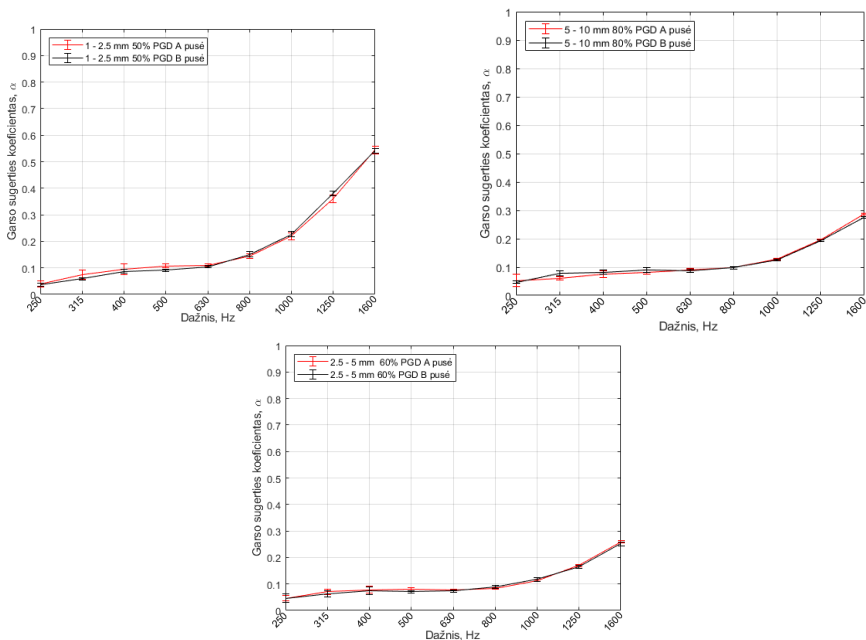
3.7 pav. Skirtingų mėginio pusių garso sugerties koeficientai, kai mėginiai pagaminti neslegiant (iškilis gesintos kalkės)

Fig. 3.7. Sound absorption coefficients of the opposite sample sides, when the samples weren't pressurised nor flipped (binder slaked lime)

3.7 paveiksle pateikiami normalinių garso sugerties koeficientų rezultatai matuojant iš skirtingų mėginio pusių vertikaliąja ašimi. Rezultatai rodo, kad garso sugerties koeficientai daugumoje mėginių skiriasi matuojant juos iš skirtingų mėginio pusių. Atlikus šį tyrimą galima teigti, kad dauguma mėginių yra akustiškai nesimetriški. Tokią kompozitinės medžiagos savybę lemia kompozitinės medžiagos paruošimo technika. Kompozitą ruošiant įprastiniuose induose kalkės dėl savo didesnio tankio nusėda indo dugne, o paruošus mėginį jo veikimo principas yra kaip sluoksniuotos medžiagos. Jei medžiaga yra

sluoksniuota, tuomet matuojant mėginį iš skirtingų pusių turi būti gaunami skirtingi rezultatai.

Pastebima tendencija, kad mažinant kalkių kiekį medžiagoje akustinis simetriškumas didėja, t. y. mažinant kalkių kiekį kompozite A ir B mėginio pusių kreivės artėja viena prie kitos. Absoliutinė garso sugertis didžiausia esant 80 % arba 90 % PGD kompozite. Esant tokioms kompozito sudėtimis garso sugerties koeficientas siekė iki 0,9. Nors yra gaunamos aukštos garso sugerties koeficiento vertės, tačiau tokia mėginių gaminimo technika yra ydinga, nes pagaminti keletą vienodų mėginių yra labai sudėtinga, todėl mėginių gaminimo technika vėliau buvo tobulinama.



3.8 pav. Skirtingų mėginio pusių garso sugerties koeficientai, kai mėginiai pagaminti perforuotoje formoje sleigiant ir vartant

Fig. 3.8. Sound absorption coefficients of the opposite sides of the samples, when the samples were made in perforated form and were pressurised and flipped

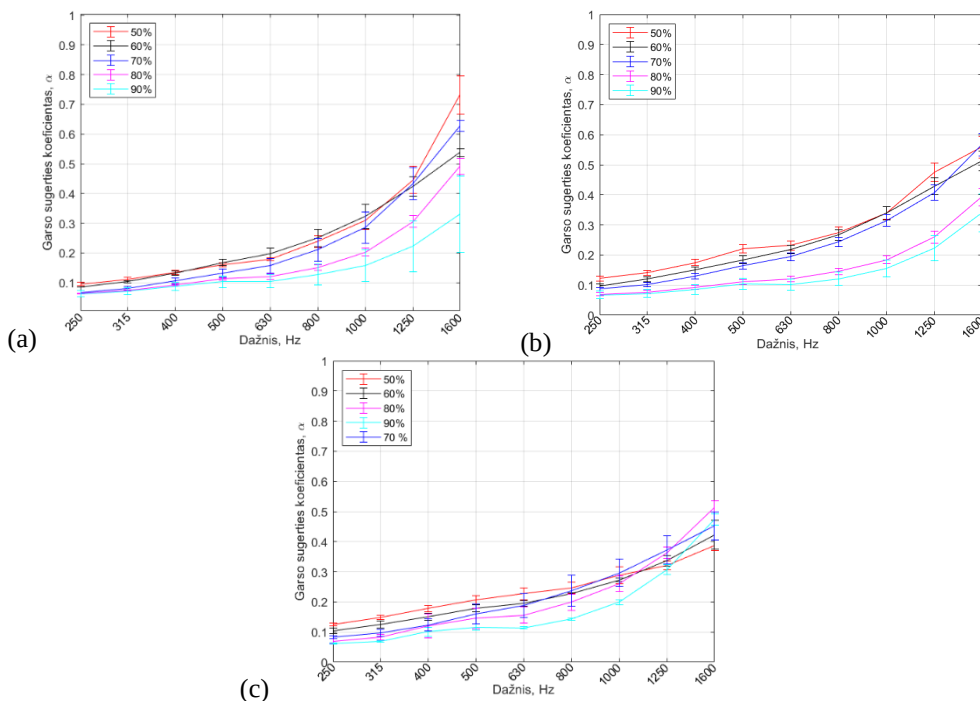
Naudojant perforuotą formą pasiektas geresnis akustinis simetriškumas (3.8 pav.). Daugumoje mėginių matuojant garso sugerties koeficientą iš A ir B mėginio pusių skirtumas skyrėsi paklaidos ribose. Šie rezultatai rodo, kad pagaminta kompozitinė medžiaga yra akustiniu požiūriu simetriška. Šie rezultatai yra svarbūs tuo, kad, taikant žinomus fizikinius garso sugerties modelius, teoriškai galima prognozuoti tokio kompozito akustines savybes. Garso sugerties

absoliučiąjų verčių skirtumas tarp abiejų mėginio pusių taikant tokį mėginių paruošimo metodą vidutiniškai sumažėjo 71 %.

Absoliučiosios garso sugerties vertės taip pat sumažėjo palyginti su garso sugerties rezultatais, kai mėginiai buvo paruošti neperforuotoje formoje. Tai galima paaiškinti tuo, kad gaminant mėginius perforuotoje formoje mėginiai buvo veikiami padidintu slėgiu. Tokiu atveju yra daroma įtaka granuliuotos medžiagos tankinimo santykiui, todėl kinta medžiagos orinė varža.

3.3.2. Popieriaus gamybos dumblo kompozitinių plokščių su gesintų kalkių rišamąja medžiaga garso sugerties tyrimai ir priklausomybė nuo PGD dalelių dydžio

Šiame poskyryje pateikiama popieriaus gamybos dumblo kompozitinių mėginių garso sugerties priklausomybė nuo procentinio kiekio kompozite. Čia yra lyginamos skirtingų PGD kompozitų garso sugerties kreivės.

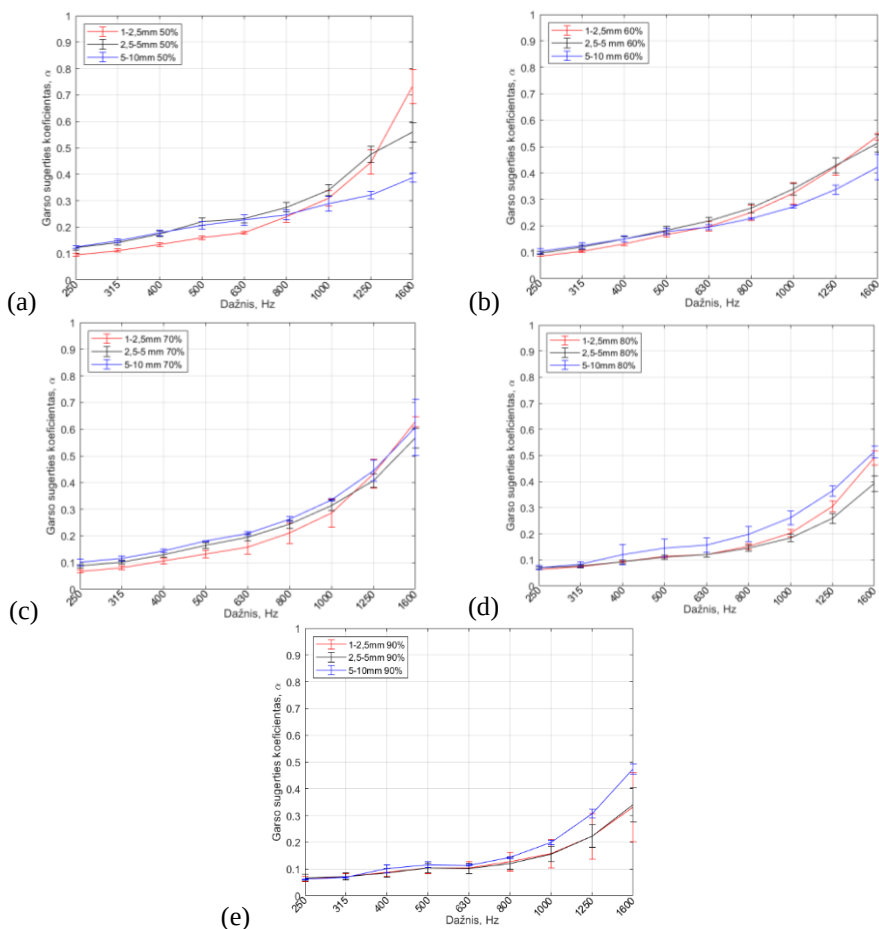


3.9 pav. PGD kompozitinių plokščių su gesintų kalkių rišamąja medžiaga garso sugertis:

(a) – 1–2,5 mm frakcija; (b) – 2,5–5 mm, (c) – 5–10 mm

Fig. 3.9. Sound absorption of PS composite panels with slaked lime binder.

(a) – 1–2,5 mm grain size, (b) – 2,5–5 mm, (c) – 5–10 mm



3.10 pav. Garso sugerties priklausomybė nuo PGD dalelių dydžio: (a) – 50 % PGD; (b) – 60 % PGD; (c) – 70 % PGD; (d) – 80 % PGD; (e) – 90 % PGD

Fig. 3.10. PS grain size influence on sound absorption, (a) – 50 % PS; (b) – 60 % PS; (c) – 70 % PS; (d) – 80 % PS; (e) – 90 % PS

Garso sugerties skirtumai tarp mėginių pateikti 3.9 paveiksle, c, esant 5–10 mm dalelių dydžiui, skiriasi paklaidos ribose. Esant šios frakcijos dalelių dydžiui mėginyje kompozitinės sudėties keitimas nedaro struktūrinių pokyčių, kurie darytų įtaką garso sugerčiai.

Esant mažesnių dalelių (1–2,5 mm; 2,5–5 mm) mėginiams matyti, kad garso sugerties ir popieriaus gamybos dumblo kiekis yra atvirkščiai proporcingas. Nepriklausomai nuo dalelių dydžio ar PGD santykio kompozite žemosios oktavos dažnių juostose (250–500 Hz) skirtumas yra minimalus tik paklaidų

ribose. Aukštesniuose dažniuose garso sugertis didėja, mažėjant PGD kiekiui kompozite. Taip yra todėl, kad paruošimo metu dėl mėginio vartymo yra išgaunamas didesnis porų lenktumas, o poros yra mažesnės, kai naudojama daugiau kalkių.

3.10 paveiksle pateikiami rezultatai tyrimo, kurio metu buvo aiškinamasi, kaip skirtingų kompozitų PGD dalelių dydis daro įtaką garso sugerčiai. Palyginimui naudojami PGD ir gesintų kalkių kompozitinės plokštės.

3.10 paveiksle rezultatai pateikiami kitaip, siekiant nustatyti PGD dalelių dydžio įtaką garso sugerčiai. Kaip ir kompozitinių PGD medžiagų tankio tyrimai, garso sugerties tyrimai parodė, kad garso sugerties priklausomybės nuo PGD dalelių dydžio nėra. Daugumoje tos pačios kompozicijos skirtingų dalelių dydžių kompozitų garso sugertis skiriasi paklaidos ribose, ir skirtumas tarp rezultatų yra nežymus.

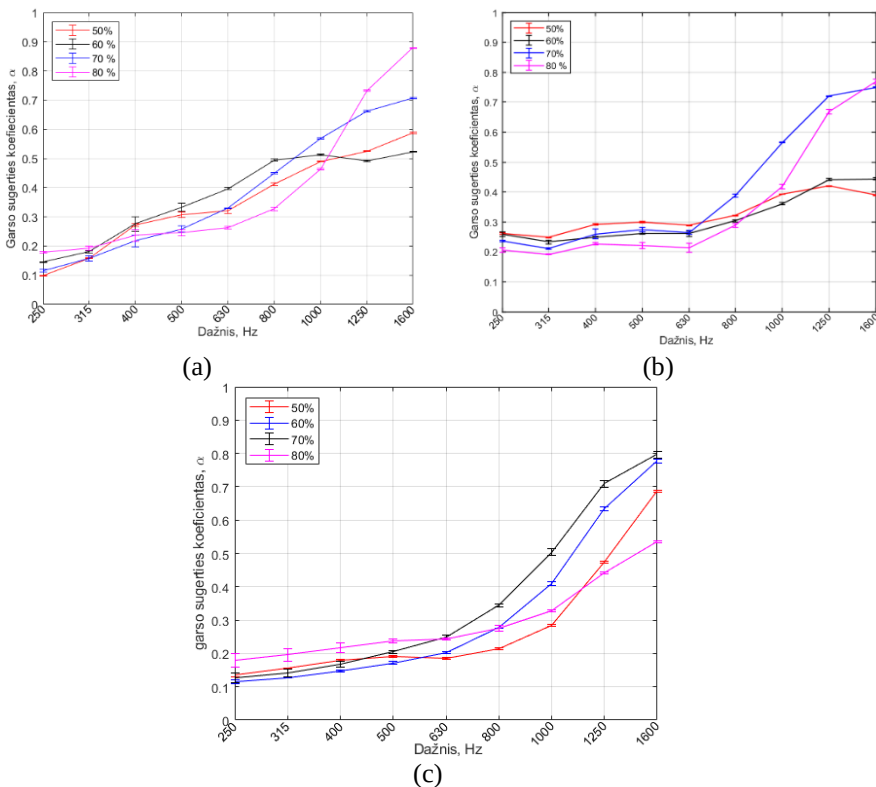
3.3.3. Popieriaus gamybos dumblo kompozitinių plokščių su molio rišamąja medžiaga garso sugerties tyrimai

Taikant aprašytą metodą, buvo pagamintos ir ištirtos PGD ir molio kompozicinės plokštės. Tankis yra parametras, nuo kurio priklauso garso sugerties koeficientas.

3.11 paveiksle pateiktos PGD ir molio kompozitinių plokščių garso sugerties koeficientų vertės. Išbandyti PGD ir molio kompozitai parodė panašius rezultatus žemesniais dažniais (iki 500 Hz). Toks panašumas priklauso nuo mėginio storio. Gerai žinoma, kad garso sugertis yra efektyvi $\frac{1}{4}$ bangos ilgio. Kadangi mėginio storis buvo sąlygiškai pastovus (14 ± 3 mm), todėl garso sugerties koeficientai ties žemesniais dažniais buvo panašūs.

3.11 paveiksle, a, pateiktos 1–2,5 mm dalelių dydžio kompozitų garso sugerties kreivės. Aukštesnių dažnių juostose, nuo 500 Hz iki 1,6 kHz, mėginių garso sugerties elgsena skiriasi. Naudojant didesnę rišiklio kiekį (50–60 % PGD) šiose oktavos dažnių juostose garso sugertis yra mažesnė, naudojant mažiau rišiklio (70–80 % PGD) – didesnė. Tokią tendenciją lemia kompozitinės medžiagos statinė orinė varža. Didžiausios garso sugerties vertės buvo rastos tiriant kompoziciją su 80 % PS (α siekia iki 0,59).

3.11 paveiksle, b, pateiktos 2,5–5 mm dalelių dydžio kompozitų garso sugerties kreivės. Atitinkamai, kaip ir 1–2,5 mm dalelių dydžio kompozitai, naudojant didesnę rišiklio kiekį (50–60 % PGD) 0,5–1,6 kHz oktavos dažnių juostose garso sugertis yra mažesnė, naudojant mažiau rišiklio (70–80 % PGD) – didesnė. Tokią tendenciją lemia kompozitinės medžiagos statinė orinė varža. Didžiausios garso sugerties vertės buvo nustatytos tiriant kompoziciją su 80 % PS (α siekia iki 0,77).



3.11 pav. PGD kompozitinių plokščių su molio rišamąja medžiaga garso sugertis:

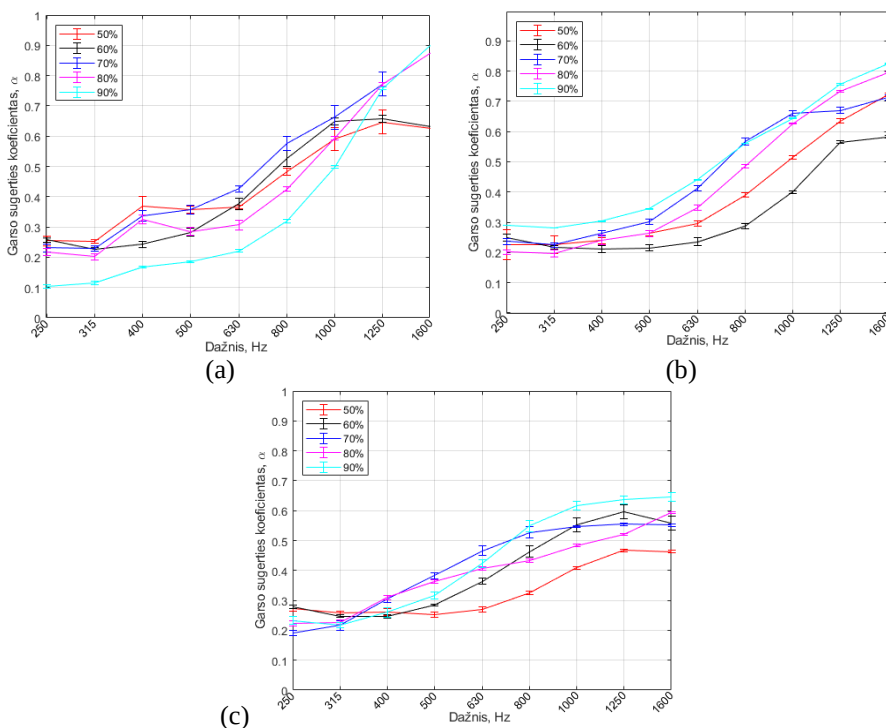
(a) – 1–2,5 mm frakcija, (b) – 2,5–5 mm frakcija, (c) – 5–10 mm frakcija

Fig. 3.11. PS and clay composite panels sound absorption. (a) – 1–2,5 mm grain size, (b) – 2,5–5 mm grain size, (c) – 5–10 mm grain size

3.11 paveiksle, c, taip pat pateikta 5–10 mm PGD frakcijos ir molio kompozitinių plokščių garso sugertis. Šiame grafike matyti, kad didesnės garso sugerties vertės yra naudojant 70 % ir 60 % PGD kompozite. Taip yra todėl, kad esant šioms kompozicijoms medžiagos tankis, kuris daro įtaką orinei varžai, yra optimaliame „lange“. Esant 50 % PGD kompozite tankis yra per didelis, kad būtų efektyvi garso sugertis, t. y. didelis medžiagos atspindėjimas, o esant 80 % PGD kompozite tankis yra per mažas, dėl to garsas, patekęs į medžiagą, nėra sugeriamas.

3.3.4. Popieriaus gamybos dumblo kompozitinių plokščių su cemento rišamąja medžiaga garso sugerties tyrimai

Taikant aprašytą metodą, buvo pagamintos ir išbandytos PGD ir cemento kompozicinės plokštės. Garso sugerties koeficientų tyrimo rezultatai pateikiami 3.12 paveiksle. Gaminant mėginius buvo išlaikomas tęstinumas ir pagrindinė kompozito medžiaga yra PGD. Subjektyviai buvo pastebėta, kad PGD ir cemento kompozitinės plokštės buvo itin trapios.



3.12 pav. PGD kompozitinių plokščių su cemento rišamąja medžiaga garso sugertis: (a) – 1–2,5 mm PGD frakcija; (b) – 2,5–5 mm; (c) – 5–10 mm

Fig. 3.12. Sound absorption of PS and cement composite panels. (a) – 1–2,5 mm grain size, (b) – 2,5–5 mm grain size, (c) – 5–10 mm grain size

3.12 paveiksle, a, pateikiama 1–2,5 mm frakcijos PGD ir cemento kompozitų garso sugerties kreivės dažnių diapazone nuo 250–1600 Hz. Tyrimais nustatyta, kad esant didesniai PGD kiekiui dažniuose nuo 250–1000 Hz garso sugerties koeficientai mažėja, o nuo 1000 iki 1600 Hz – didėja. Taip yra todėl, kad, didinant PGD kiekį kompozite, bendras kompozito tankis mažėja ir tai daro įtaką garso sugerčiai žemuose ir vidutiniuose dažniuose. Kadangi tankis yra tiesiogiai susijęs

su medžiagos poringumu, tikėtina, kad mėginių (80–90 % PGD) poringumas yra didesnis, todėl kompozitai, kuriuose yra mažiau rišamosios medžiagos (cemento), yra poringesni. Medžiagos poringumas yra parametras, kuris daro įtaką aukštesniuose dažniuose.

3.12 paveiksle, b, pateikiamos 2,5–5 mm frakcijos PGD ir cemento kompozitų garso sugerties kreivės dažnių diapazone nuo 250–1600 Hz. Grafike matyti, kad garso sugertis didėja didinant dažnį. Kaip ir 3.8 paveiksle, garso sugertis aukštesniuose dažniuose yra didesnė tų kompozitų, kuriuose yra didesnis PGD kiekis.

3.12 paveiksle, c, pateikiamos 5–10 mm frakcijos PGD ir cemento kompozitų garso sugerties kreivės dažnių diapazone nuo 250–1600 Hz. Kaip ir A ir B paveiksluose matyti, kad šios frakcijos garso sugertis žemesniuose dažniuose (250–400 Hz) yra panaši ir priklausomybė nuo kompozito sudėties nebuvo nustatyta. Tačiau aukštesniuose dažniuose matyti, kad garso sugertis yra didesnė, jei kompozite yra naudojamas didesnis PGD kiekis.

3.3.5. Rezultatų apibendrinimas ir diskusija

3.3 poskyrio rezultatams apibendrinti pateikta 3.4 lentelė. Joje pateikiami ištirtų kompozitinių plokščių su gesintomis kalkėmis garso sugerties koeficientai orientuojantis į pritaikomumą realiose patalpose. Pasirinkti dažniai yra reglamentuoti STR 2.01.07:2003 „Pastatų vidaus ir išorės aplinkos apsauga nuo triukšmo“, šiame reglamente minima, kad aidėjimo trukmė turi neviršyti leistinos ribinės vertės 500, 1000 ir 2000 Hz oktavos dažnių juostose, todėl palyginimui pasirinktos 500 ir 1000 Hz gautos garso sugerties vertės. 2000 Hz oktavos dažnių juostose tyrimai nebuvo atliekami orientuojantis į žemesnio dažnio garsus, kuriuos dėl didesnio bangos ilgio yra sudėtingiau sugerti. Jeigu garsas yra efektyviai sugeriamas žemesnėse oktavos dažnių juostose nei 1000 Hz, tikėtina, kad garso sugertis 2000 Hz oktavos dažnių juostoje bus didesnė. Šioje lentelėje pateiktos tik akustiškai simetriškų mėginių garso sugerties koeficientų vertės.

3.4 lentelėje matyti, kad pasirinktuose dažniuose pagal STR 2.01.07:2003 garso sugerties koeficientai kinta siauruose režiuose, 500 Hz oktavos dažnių juostoje kinta nuo 0,10 iki 0,22, o 1000 Hz – nuo 0,16 iki 0,34.

3.4 lentelė. PGD ir gesintų kalkių kompozitinių plokščių garso sugertis 500 ir 1000 Hz oktavos dažnių juostose

Table 3.4. Sound absorption of PS and slaked lime composite panels in 500 and 1000 Hz octave bands.

PGD kiekis kompozite, %	PGD dalelių dydis, mm	Garso sugerties koeficientas $\alpha_{500\text{Hz}}$	Garso sugerties koeficientas $\alpha_{1000\text{Hz}}$	$\alpha_{\text{vid.}}$
50	1–2,5 mm	0,16	0,31	0,27
60	1–2,5 mm	0,17	0,32	0,25
70	1–2,5 mm	0,13	0,28	0,23
80	1–2,5 mm	0,11	0,20	0,18
90	1–2,5 mm	0,10	0,16	0,14
50	2,5–5 mm	0,22	0,34	0,28
60	2,5–5 mm	0,18	0,34	0,25
70	2,5–5 mm	0,16	0,32	0,25
80	2,5–5 mm	0,11	0,18	0,16
90	2,5–5 mm	0,10	0,16	0,14
50	5–10 mm	0,21	0,29	0,23
60	5–10 mm	0,17	0,28	0,22
70	5–10 mm	0,16	0,30	0,22
80	5–10 mm	0,15	0,26	0,21
90	5–10 mm	0,12	0,20	0,18

3.5 lentelėje pateikti kompozitinės plokštės su moliu tyrimų rezultatai. Pastebima, kad kompozitinių plokščių su moliu garso sugerties koeficientai yra didesni, palyginti su kompozitinėmis plokštėmis, pagamintomis su kalkėmis. Tyrimais nustatyti garso sugerties koeficientai kinta 500 Hz oktavos dažnių juostoje nuo 0,14 iki 0,30, o 1000 Hz – nuo 0,26 iki 0,57. Nustatyta, kad garso sugerties koeficientų reikšmės yra optimalios naudojant 70 %:30 % PGD ir molio santykį. Naudojant 1–2,5 mm PGD frakcijos dydį garso sugerties koeficientas 500 Hz ir 1000 Hz oktavos dažnių juostose atitinkamai buvo 0,21 ir 0,46, naudojant 2,5–5 mm frakcijos dydį – 0,28 ir 0,57.

3.5 lentelė. PGD ir molio kompozitinių plokščių garso sugertis 500 ir 1000 Hz reglamentuojamose oktavos dažnių juostose

Table 3.5. Sound absorption of PS and clay composite panels in 500 and 1000 Hz octave bands

PGD kiekis kompozite, %	PGD dalelių dydis, mm	Garso sugerties koeficientas 500 Hz	Garso sugerties koeficientas 1000 Hz	$\alpha_{vid.}$
50	1–2,5 mm	0,14	0,26	0,35
60	1–2,5 mm	0,21	0,49	0,35
70	1–2,5 mm	0,21	0,46	0,39
80	1–2,5 mm	0,17	0,36	0,39
50	2,5–5 mm	0,30	0,39	0,21
60	2,5–5 mm	0,26	0,36	0,33
70	2,5–5 mm	0,28	0,57	0,41
80	2,5–5 mm	0,22	0,41	0,35
50	5–10 mm	0,22	0,29	0,28
60	5–10 mm	0,17	0,41	0,32
70	5–10 mm	0,20	0,50	0,36
80	5–10 mm	0,24	0,33	0,29

3.6 lentelėje pateikti PGD ir cemento garso sugerties koeficientai 500 ir 1000 Hz oktavos dažnių juostose. Nepriklausomai nuo kompozito sudėties garso sugerties koeficientai 500 Hz dažnyje varijuoja nuo 0,18 iki 0,36, 1000 Hz – 0,41–0,64. Palyginus visus skirtingus kompozitus akustiniu požiūriu PGD – cemento kompozitai yra efektyviausi vertinant šiose inžinerijai svarbiose oktavos dažnių juostose. Tačiau subjektyviai buvo pastebėta, kad šie kompozitai yra itin trapūs, o mažinant rišklio kiekį gaunamos didesnės garso sugerties reikšmės, tai tiesiogiai daro įtaką plokščių tvirtumui.

Duomenų apie kitų autorių tirtas PGD kompozitinių plokščių garso sugerties savybes nebuvo rasta. Žinios apie tokio tipo kompozitus vis dar yra ribotos. Palyginus su kitų autorių kuriamomis garsą sugeriančiomis medžiagomis, PGD kompozitų garso sugertis matuojamame dažnių diapazone yra panaši arba šiek tiek didesnė (Oancea et al., 2018; Taban, Valipour et al., 2020; Ulrich & Arenas, 2020). Taip yra todėl, kad PGD kompozitinės plokštės pasižymi gan dideliu tankiu.

3.6 lentelė. PGD ir cemento kompozitinių plokščių garso sugertis 500 ir 1000 Hz reglamentuojamose oktavos dažnių juostose

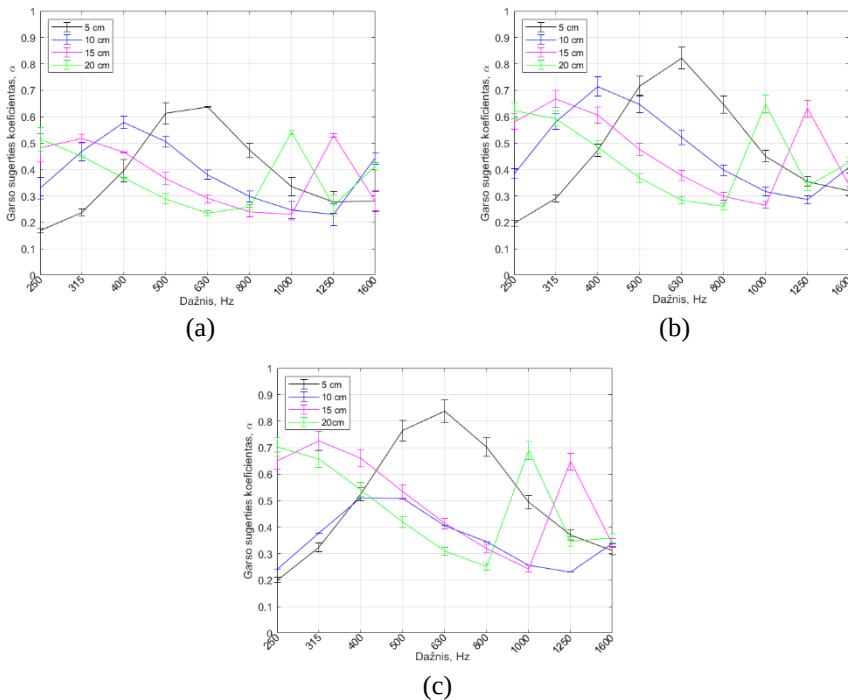
Table 3.6. Sound absorption of PS and cement composite panels in 500 and 1000 Hz octave bands

PGD kiekis kompozite, %	PGD dalelių dydis, mm	Garso sugerties koeficientas 500 Hz	Garso sugerties koeficientas 1000 Hz	$\alpha_{vid.}$
50	1–2,5 mm	0,36	0,59	0,44
60	1–2,5 mm	0,35	0,59	0,44
70	1–2,5 mm	0,44	0,59	0,46
80	1–2,5 mm	0,29	0,59	0,41
90	1–2,5 mm	0,18	0,50	0,36
50	2,5–5 mm	0,26	0,51	0,39
60	2,5–5 mm	0,20	0,46	0,36
70	2,5–5 mm	0,30	0,66	0,45
80	2,5–5 mm	0,26	0,63	0,43
90	2,5–5 mm	0,34	0,64	0,44
50	5–10 mm	0,25	0,41	0,33
60	5–10 mm	0,34	0,29	0,32
70	5–10 mm	0,38	0,55	0,43
80	5–10 mm	0,36	0,48	0,40
90	5–10 mm	0,32	0,62	0,42

Kitų autorių tiriamos medžiagos yra lengvesnės (tankis 100–150 kg/m³), palyginti su PGD kompozitinėmis plokštėmis (tankis 460,2–1148,4 kg/m³). 8 mm storio poliesterio medžiagos garso sugertis 500 ir 1000 Hz dažniuose atitinkamai siekė 0,1 ir 0,25 (Ulrich & Arenas, 2020). 10 mm storio ananasų lapų pluošto – 0,3 ir 0,2 (Putra et al., 2018); 10 mm aliejaus palmių vaisių pluošto – 0,2 ir 0,3 (Or et al., 2017). Palyginimui PGD kompozitinių plokščių garso sugerties koeficientas 500 Hz dažnyje kinta nuo 0,1 iki 0,44, o 1000 Hz – nuo 0,13 iki 0,66.

3.3.6. Garso sugerties priklausomybė nuo oro tarpo už porėtos medžiagos

Šiame poskyryje nagrinėjama oro tarpo už porėtos medžiagos įtaka garso sugerčiai.



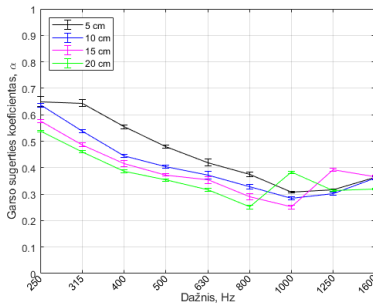
3.13 pav. Garso sugerties priklausomybė nuo oro tarpo dydžio (rišiklis gesintos kalkės):
(a) – 1–2,5 mm 50 % PGD; (b) – 2,5–5 mm 50 % PGD; (c) – 5–10 mm 50 % PGD

Fig. 3.13. Airgap influence on sound absorption (binder slaked lime). (a) – 1–2,5 mm 50 % PS; (b) – 2,5–5 mm 50 % PS; (c) – 5–10 mm 50 % PS

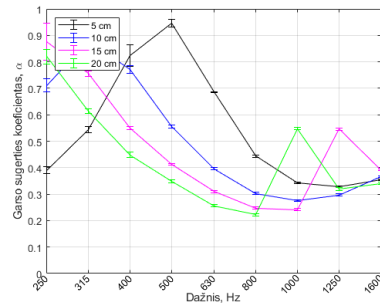
Esant sistemai su oro tarpu pastebima, kad garso sugerties maksimumas nustatomas dažniuose, kurie atitinka ketvirtadalį bangos ilgio. Garso bangos judėjimas prie standaus sandarinimo (taikymo atveju sienos) yra 0, tuomet esant $\frac{1}{4}$ bangos ilgio pasiekama didžiausia bangos amplitudė, todėl akustinė sistema yra efektyviausia esant atitinkamam storiui (Asdrubali et al., 2008). Akustikų bendruomenėje šis fizikinis reiškinys yra vadinamas $\frac{1}{4}$ bangos ilgio taisykle. Tiriamąją akustinę sistemą sudaro porėta terpė (PGD kompozitinė plokštė ir oro tarpas). Tokia akustinė sistema veikia kaip membraninis absorberis. Tokio tipo absorberyje 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.

3.13 paveiksle matyti, kad garso sugerties koeficientai priklauso nuo oro tarpo dydžio. Visais tirtais atvejais nustatyta, kad įdiegus oro tarpą į akustinę

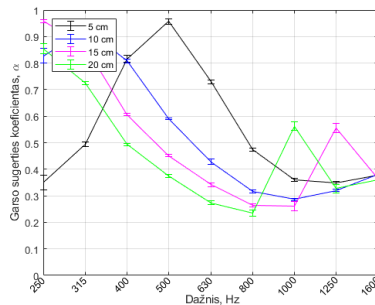
sistemą garso sugerties koeficientų reikšmės padidėja, tačiau atsiranda dažnių zonos, kuriose garsas sugeriamas labai gerai arba prastai. Taip yra todėl, kad veikiant PGD plokštei kaip membranai susidaro teigiamos arba neigiamos bangų interferencijos. Keičiant oro tarpo dydį matyti, kad garso sugerties maksimumai slenkasi per dažnių juostą, o tai yra labai svarbu projektuojant ir parenkant akustinę sistemą patalpose. Jei yra didinamas akustinės sistemos storis, tuomet ši sistema geba sugerti žemesnio dažnio garsus, nes tokia sistema tenkina reikalavimus bangos ilgiui. Garso sugerties minimumai gaunami aukštesnėse oktavos dažnių juostose, nes akustinė sistema tuose dažniuose pradeda veikti kaip rezonatorius, susidarius garso rezonansui akustinėje sistemoje, garso sugertis krinta.



(a)



(b)



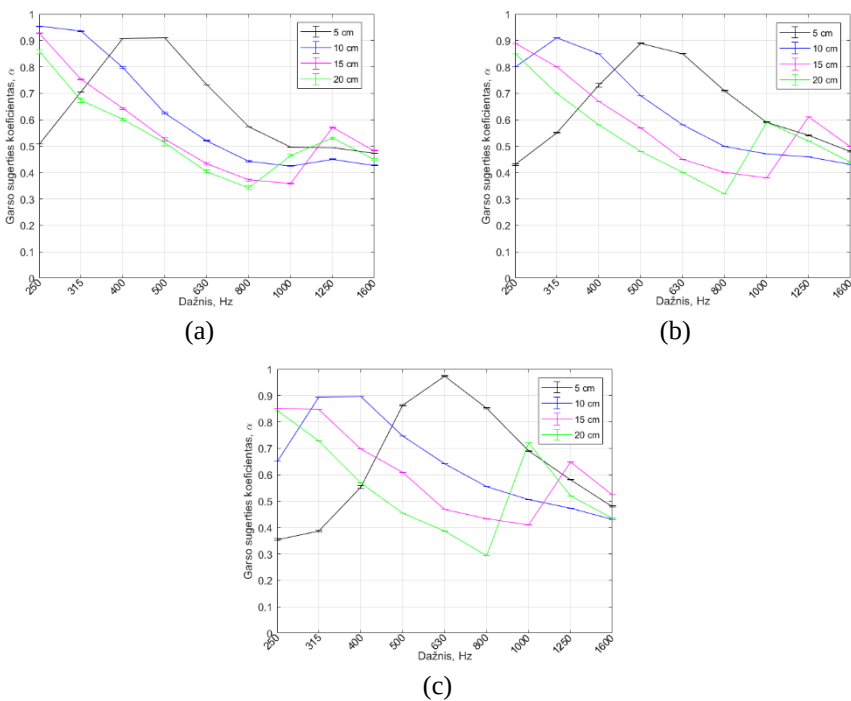
(c)

3.14 pav. Garso sugertis naudojant skirtingus oro tarpus (rišiklis molis): (a) – 1–2,5 mm 70 % PGD; (b) – 2,5–5 mm 70 % PGD; (c) – 5–10 mm 70 % PGD

Fig. 3.14. Sound absorption with various airgaps (binder clay). (a) – 1–2,5 mm 70 % PS; (b) – 2,5–5 mm 70 % PS; (c) – 5–10 mm 70 % PS

3.14 paveiksle pateikta PGD ir molio kompozitų garso absorbcija naudojant skirtingą oro tarpą už mėginių. Naudojant 1–2,5 mm ir molio (50 %) mėginius matuojamame dažnių diapazone nėra matomų neigiamų bangų interferencijų.

Taip gaunamos stabilesnės, bet mažesnės garso absorbcijos koeficiento vertės. Tokiems reiškiniams įtakos turi pats mėginys, sugerdamas tam tikrų dažnių bangą ir dėl to nėra bangos, kuri interferuotų. Toks reiškinys buvo nustatytas vienu atveju: naudojant 1–2,5 mm frakcijos 50 % PGD ir molio mėginį, kuris yra tankesnis, palyginti su 2,5–5 mm 70 % PGD ir 5–10 mm 70 % PGD. Naudojant šiuos mėginius, rezonansai yra aiškiai matomi. Kai akustinėje sistemoje yra 15 ar 20 cm oro tarpas, tuomet garso sugerties maksimumai nebuvo nustatyti. Turima matavimo sistema riboja nustatyti didžiausiąsias garso sugerties vertes, kurios, tikėtina, yra žemesniuose dažniuose nei 250 Hz.



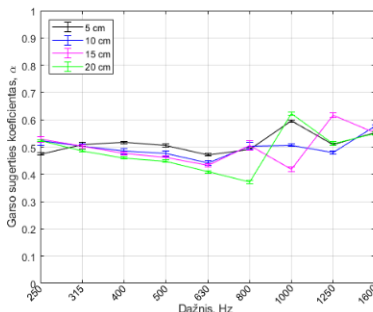
3.15 pav. Garso sugertis naudojant skirtingus oro tarpus (rišiklis cementas):
 (a) – 1–2,5 mm 70 % PGD; (b) – 2,5–5 mm 70 % PGD; (c) – 5–10 mm 70 % PGD

Fig. 3.15. Sound absorption with various airgaps (binder cement).

(a) – 1–2,5 mm 70% PS; (b) – 2,5–5 mm 70 % PS; (c) – 5–10 mm 70% PS

3.15 paveiksle pateikiama oro tarpo įtaka, kai yra naudojamos PGD ir cemento kompozitinės plokštės. Kaip ir atvejais naudojant gesintų kalkių ir molio kompozitines plokštes matyti, kad akustinėje sistemoje susidaro neigiamos bangų interferencijos. Todėl atitinkamoje oktavos dažnių juostoje, priklausomai nuo akustinės sistemos storio, pasiekiamas garso sugerties pikas. Tokių akustinių

sistemų garso sugerties maksimumo vieta dažniniame spektre priklauso nuo oro tarpo dydžio tarp garsą sugeriančios plokštės ir atspindinčio paviršiaus. Pastebėta, kad tokios akustinės sistemos iš dalies veikia kaip membraninis absorberis. PGD kompozitinė plokštė nėra standi, todėl vibruodama sukelia galimybę akustinei sistemai rezonuoti. Todėl esant oro tarpui garso sugertis padidėja gan siaurame oktavos dažnių ruože.



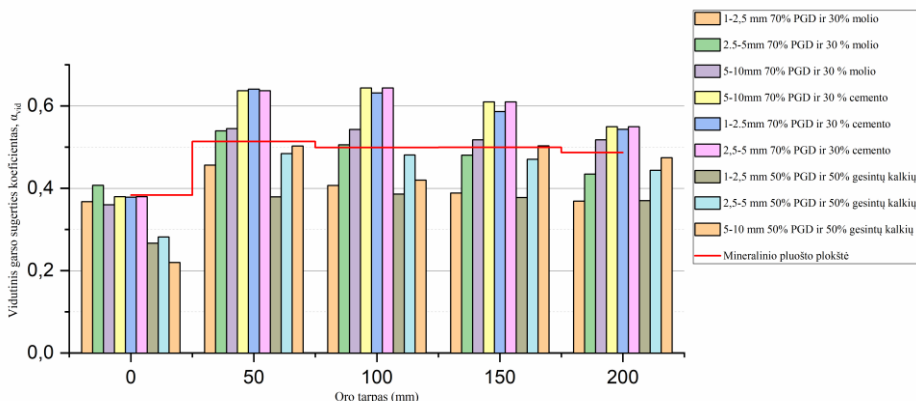
3.16 pav. Referentinės, parduodamos rinkoje mineralinės vatos plokštės garso sugertis
Fig. 3.16. Sound absorption of the reference mineral wool panel which is sold on market

Siekiant patikrinti PGD kompozitinių plokščių efektyvumą buvo išmatuota referentinė, rinkoje parduodama, plona garsą sugerianti plokštė. 3.16 paveiksle pateikiama referentinės rinkoje parduodamos mineralinės vatos plokštės garso sugertis naudojant oro tarpą. Matuojamame dažnių diapazone neigiamų bangų interferencijų nenustatyta. Taip gaunamos stabilesnės, bet mažesnės garso absorbcijos koeficiento vertės. Kaip ir PGD bei molio atveju numanoma, kad tam įtaką darė pati plokštė. Naudojant šią plokštę garso sugerties rodikliai buvo pastovūs, palyginti su PGD plokštėmis. Garso sugertis kito nuo 0,4 iki 0,6, kai PGD rezultatai svyravo nuo 0,25 iki 0,95.

Kadangi disertacijos metu suprojektuotu įrenginiu dėl inžinerinių ir taikymo priežasčių buvo koncentruojamasi į vidutinius ir žemesnius dažnius, svertinio garso absorbcijos koeficiento skaičiavimas yra negalimas. Norint tiesiogiai palyginti garsą sugeriančias plokštes, nuspręsta naudoti vidutinę išmatuotų dažnių juostų garso sugerties koeficiento vertę.

3.17 paveiksle pateiktas vidutinio garso sugerties koeficiento priklausomybės nuo oro tarpo grafikas. Akivaizdu, kad bet kokia oro erdvė už mėginio padidina garso sugertį. Šiame grafike parodyta, kad optimali garso sugertis yra 50 mm atstumu nuo mėginio, nekreipiant dėmesio į mėginį. Aiškiai matyti, kad 1–2,5 mm 50 % PGD mėginys su gesintomis kalkėmis turi mažesnę vidutinę garso absorbciją. Nors 1–2,5 mm 50 % PGD mėginys su cementu parodė gan mažą garso absorbciją be oro tarpo ($\alpha_{vid.} = 0,36$), tačiau visos kitos konfigūracijos parodė didžiausias vidutinės garso absorbcijos vertes ($\alpha_{vid.}$ iki 0,55). Tokie rezultatai

rodo potencialų PGD ir molio kompozitų panaudojimą akustinėms reikmėms. Palyginus rezultatus su komerciškai gaminama akustine plokšte (α_{vid} iki 0,51), PGD ir molio kompozicinės plokštės rodo panašų arba šiek tiek geresnį akustinį efektyvumą. PGD ir gesintų kalkių kompozitinių plokščių garso sugertis esant oro tarpui ir nesant jo nesiekia komerciškai gaminamos garso sugeriančios plokštės.

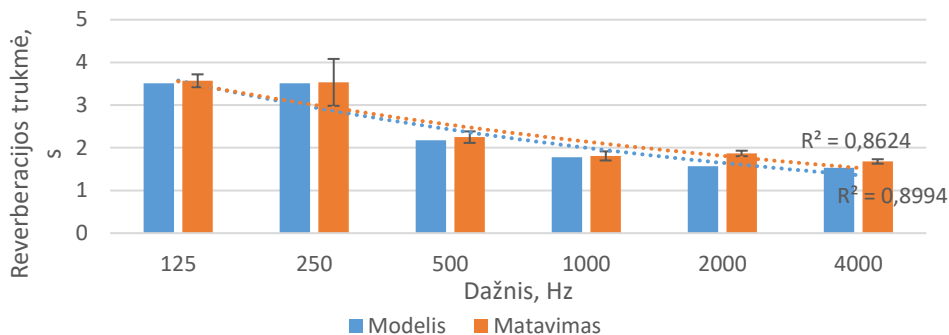


3.17 pav. Vidutinės garso sugerties vertės 250–1600 Hz diapazone, naudojant oro tarpą
Fig. 3.17. Average values of the sound absorption coefficient within the frequency range of 250–1600 Hz, while using the airgap

3.4. Reverberacijos trukmės modeliavimo rezultatai

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).

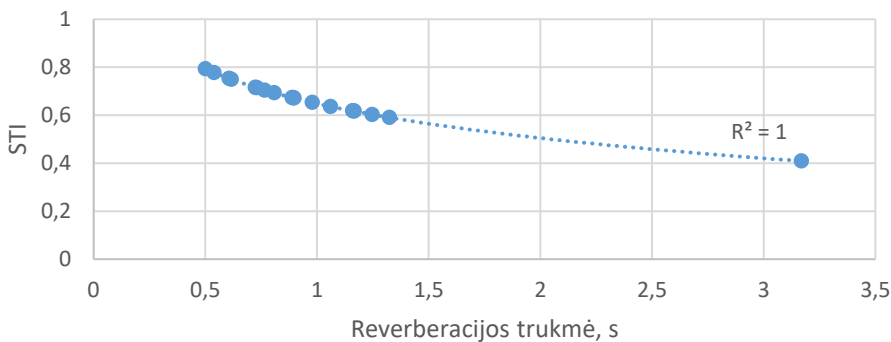
Siekiant įvertinti modelio tinkamumą, visų pirma, prieš atliekant PGD absorberių įtakos reverberacijos trukmei modeliavimą, buvo atliktas reverberacijos modelio patikrinimas. Modeliavimo rezultatai buvo palyginti su eksperimentiniais rezultatais realioje patalpoje. Įsitikinus, kad modelis yra tinkamas,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



3.18 pav. Reverberacijos trukmės modelio patikrinimas

Fig. 3.18. Verification of the reverberation time calculation model

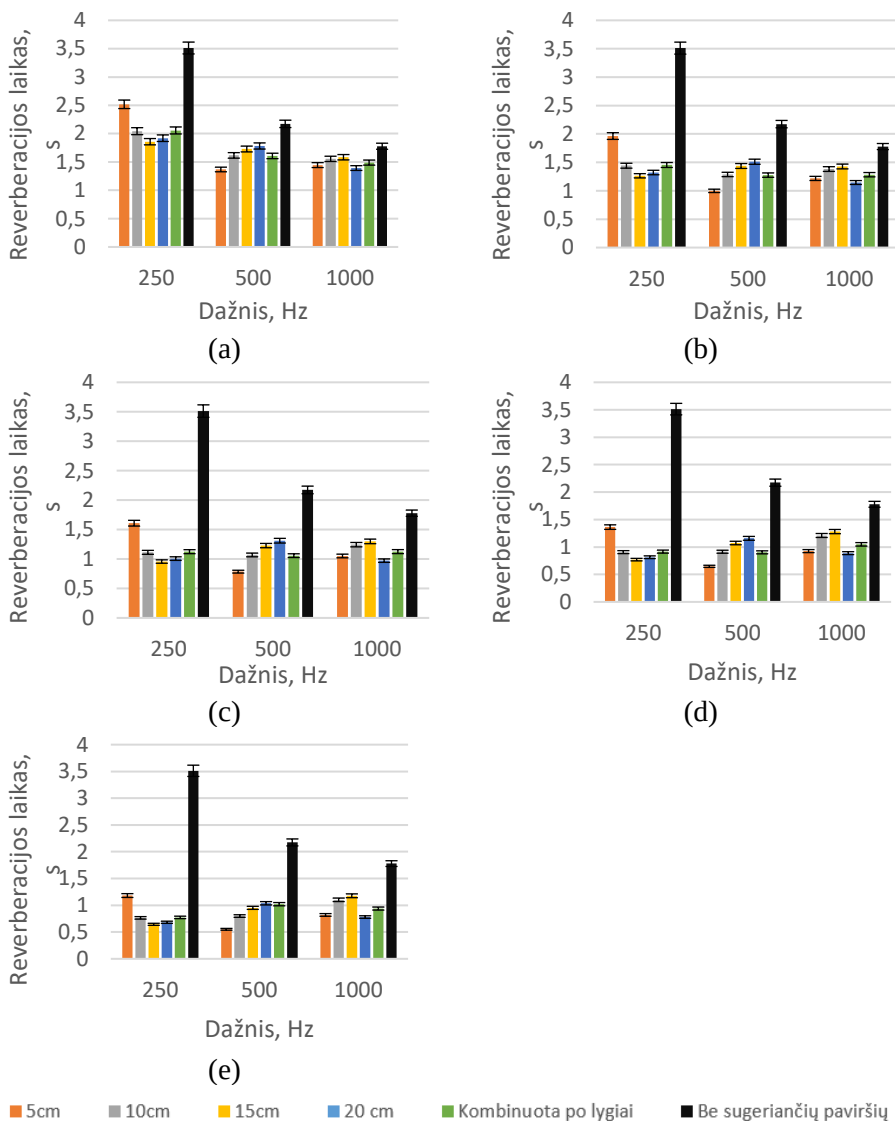
3.19 paveiksle pateikta STI rodiklio kitimas kintant reverberacijos trukmei. Reverberacijos trukmė yra atvirkščiai proporcinga STI rodikliui. Tarp šių dviejų parametrų yra logaritminė priklausomybė. Didėjant reverberacijos laikui patalpoje kalbos perdavimo rodiklis mažėja. Ši priklausomybė buvo patikrinta naudojant eksperimentinius reverberacijos trukmės tyrimo rezultatus.



3.19 pav. STI rodiklio priklausomybė nuo reverberacijos trukmės

Fig. 3.19. Reverberation time influence on speech transmission index

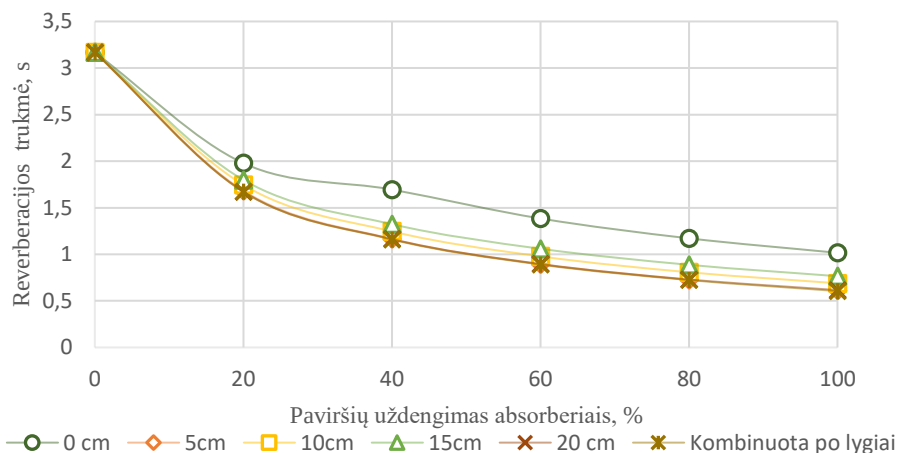
3.20 paveiksle pateikiamos patalpos reverberacijos trukmės modeliavimo vertės keičiant absorberio oro tarpą ir sienų padengimo plotą absorberiais. Disertacijos darbe siūlomas garso absorberis yra sieninis, todėl padengimas keičiamas nuo 20 iki 100 % sienų ploto, grindys ir lubos yra nedengiamos. Iš grafikų matyti, kad sukurta sistema geriausiai veikia, kai naudojami absorberiai su skirtingais oro tarpais ir juos kombinuojant.



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

Fig. 3.20. Reverberation time in the room while using the designed construction: (a) – 20 % coverage of the surface area; (b) – 40 %; (c) – 60 %; (d) – 80 %; (e) – 100 %;

Kombinuojant absorberius išgaunamas reverberacijos trukmės mažinimas platesniame oktavos dažnių juostų spektre. Remiantis 3.20 paveiksle pateiktais rezultatais galima teigti, kad norint išgauti plačiajuostį 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.

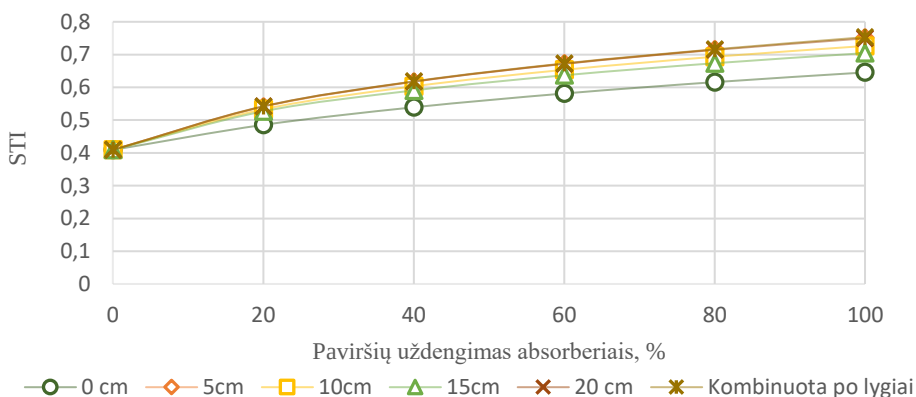


3.21 pav. Reverberacijos trukmės kitimas didinant absorberių kiekį patalpoje

Fig. 3.21. The quantity of sound absorbers influence on reverberation time

3.21 paveiksle pateiktas reverberacijos trukmės kitimas didinant absorberių kiekį patalpoje. Sienų padengimas absorberiais buvo keičiamas žingsniais kas 20 % sienų ploto. Didinant absorberių sugerties plotą reverberacijos trukmė mažėja. Didžiausias reverberacijos trukmės sumažėjimas nustatytas, naudojant absorberių kombinaciją esant skirtingiems oro tarpams, reverberacijos trukmės sumažėjimas siekė iki 80,9 %.

Įdiegus PGD absorberių sistemą kalbos suprantamumas padidėja naudojant absorberius ant 20 % sienų ploto (3.22 pav.). Palyginti su atveju, kai nenaudojami absorberiai, STI rodiklis padidėja nuo 18,6 iki 32,1 %. Priklausomai nuo absorberio oro tarpo ir sugerties ploto STI rodiklis padidėjanuo 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).



3.22 pav. Kalbos perdavimo indekso kitimas didinant absorberių kiekį patalpoje
Fig. 3.22. Quantity of sound absorbers influence on speech transmission index

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, tokiu būdu geriau sugeriami žemesnių oktavos dažnių garsai, kurių reverberacijos trukmė paprastai būna didesnė palyginti su aukštesnių dažnių juostomis.

3.5. Reguliuojamas porėtas garso absorberis

Šiame poskyryje pateikiami disertacijos pagrindu sukurtos konstrukcijos pagrindiniai parametrai. Ši konstrukcija yra patentuota Lietuvoje.

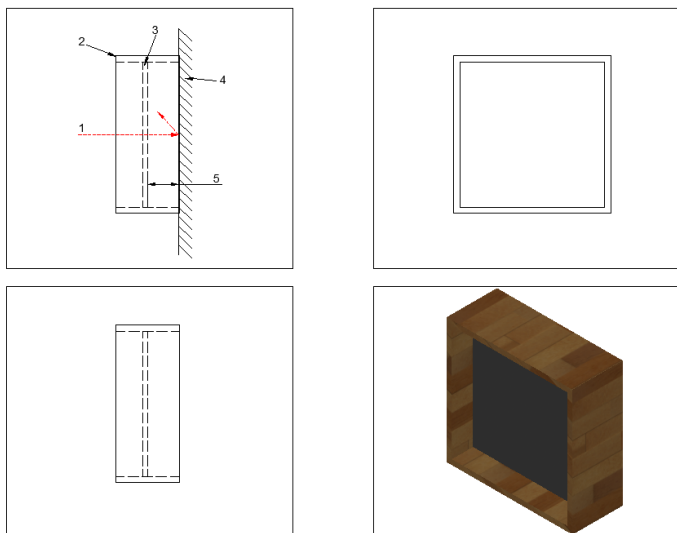
Oru sklindantį garsą sugeriančios sienos arba lubų plokštės aprašytos Jungtinių Amerikos Valstijų patente 1980 m. Nr. US4347912A (*Airborne-sound-absorbing wall or ceiling panelling*). Porėtas garso absorberis aprašytas pasauliniame patente Nr. WO 2007073732A2 (*Multi-layered porous sound-absorber*), paskelbtame 2011 m. balandžio 28 d. Taip pat porėta garso absorbcinė konstrukcija aprašyta Jungtinių Amerikos Valstijų patente Nr. US8631899B2 (*Sound absorber*), paskelbtame 2010 m. gruodžio 9 d. Lietuvos patentų biure analogų nebuvo rasta.

Pirmoji paminėta išradimo analogija yra plačiai taikoma garsą sugerianti konstrukcija šiuo metu statybose. Šią konstrukciją sudaro perforuota plokštė, porėtos medžiagos sluoksnis ir oro tarpas iki pastato elemento (atitvaros arba

perdangos). Tokio tipo konstrukcijos plačiai taikomos auditorijose, koridoriuose, laukimo salėse ir t. t. Tokio tipo konstrukcijos remiasi garso bangų rezonansų ir porėtų medžiagų garso sugertimi. Tokios konstrukcinės sistemos trūkumas yra tai, kad garso sugertis yra sąlygiškai siaurame dažnių diapazone.

Antrasis paminėtas konstrukcijos analogas, aprašytas patente Nr. WO 2007073732A2, veikia tuo pačiu principu kaip ir paminėtas prieš tai. Ši konstrukcija yra paprastesnė už 1980 m. aprašytą Jungtinių Amerikos Valstijų patente Nr. US4347912A. Ši konstrukcija nuo paminėtos skiriasi tuo, kad joje nėra perforuotos plokštės. Šio išradimo veikimo principas paremtas porėtos pluoštinės medžiagos ir oro tarpo už jos garso sugerties visuma. Prototipo trūkumas yra tai, jog porėta medžiaga yra standžiai įtvirtinama, todėl nėra galima reguliuoti absorberio garso sugerties.

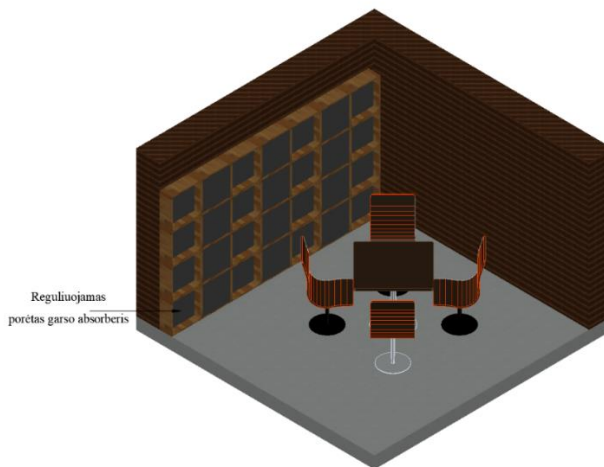
Trečioji paminėta analogiška konstrukcija aprašyta Jungtinių Amerikos Valstijų patente Nr. US8631899B2, ji skiriasi nuo prieš tai paminėtų konstrukcijų tuo, kad naudojama keletas skirtingų porėtų medžiagų, bet nėra oro tarpo. Tokio tipo konstrukcijų privalumas, palyginti su kitomis paminėtomis, tas, kad bendras patalpos tūris yra sumažinamas mažiau. Tačiau bendra garso sugertis mažesnė, palyginti su prieš tai paminėtomis analogiškoms konstrukcijomis. Tokia konstrukcija reikalauja didelio garsą sugeriančių medžiagų kiekio norint pasiekti efektyvų garso sugėrimą patalpoje.



3.23 pav. Reguliuojamas garso absorberis
Fig. 3.23. Adjustable porous sound absorber

Reguliuojamo porėto garso absorberio veikimo principas paremtas porėtos medžiagos garso sugerties ir sklindančio garso bangų rezonansu (žr. 3.23 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.

Kadangi akustinių garsą sugeriančių sistemų garso sugertis yra efektyviausia esant $\frac{1}{4}$ bangos ilgiui, todėl oro tarpas (5) už kompozitinės popieriaus gamybos dumblo plokštės (4) yra reguliuojamas, kad absorberis galėtų būti taikomas platesnio dažnių diapazono garsams sugerti. Naudojant keletą arba keliolika tokių absorberių, nustačius skirtingus oro tarpus (5) už porėtos popieriaus gamybos dumblo plokštės (3), galima išgauti platų garso sugerties dažninį diapazoną.



3.27 pav. Konstrukcijos vizualizacija patalpoje
Fig. 3.27. Visualisation of the structure in the room

Ši konstrukcija išsiskiria nuo kitų panašių konstrukcijų tuo, kad:

- naudojama veiklioji garsą sugerianti plokštė pagaminta iš popieriaus gamybos dumblo kompozito (3), įrenginys turi galimybę būti reguliuojamas, t. y. didinti arba mažinti oro tarpą (5) tarp kompozitinės popieriaus gamybos dumblo plokštės (3) ir pastato konstrukcijos (4);
- įrenginio garso sugerties dažniai kinta, nekeičiant konstrukcijos;

- patalpoje naudojant keletą ar keliolika absorberių, galima išgauti garso sugertį plačiame dažnių diapazone, esant absorberių sistemai (naudojami skirtingi oro tarpo (5) atstumai už absorberių plokščių (3)).

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Medžiagos statinė orinė varža mažėja didinant popieriaus gamybos dumblo dalelių dydį, tai lemia didesnę granuliuotos terpės poringumą. Priklausomai nuo medžiagos storio, statinė orinė varža dėl frakcijos padidėjimo sumažėja 22–48 %.
2. Padidinus popieriaus gamybos dumblo kiekį kompozitinėje garsą sugeriančioje plokštėje 10 %, statinė orinė varža mažėja nuo 2,7 iki 164,5 kPa·s/m². Didinant popieriaus gamybos dumblo kiekį plokštėje, mažėja jos tankis, todėl garso sugerties efektyvumas aukštesniuose dažniuose didėja.
3. Teoriniu tyrimu nustatyta, kad dažnių diapazone 1–250 Hz garso sugerties koeficientų vertės yra sąlygiškai žemos (α siekia iki 0,06). Žemas garso sugerties vertes lemia nedidelis garsą sugeriančios plokštės storis (10 mm). Žemų dažnių ruože garsą sugeria geriausiai didele statine orine varža ir tankiu pasižyminčios PGD kompozitinės medžiagos. Didžiausia garso sugertis buvo nustatyta ($\alpha = 0,06$, esant 250 Hz dažniui), tiriant 5–10 mm 50 % PGD – gesintų kalkių plokštę, kurios statinė orinė varža $\sigma = 379,8$ kPa·s/m², o tankis $\rho = 724,4$ kg/m³.
4. Dažnių diapazone nuo 1,6–4 kHz garso sugerties koeficientų vertės yra didesnės, esant mažesnėms statinės orinės varžos vėrtėms. Teoriškai dažnių diapazone 1,6–4 kHz didžiausia garso sugertis buvo nustatyta ($\alpha = 0,92$, esant 4000 Hz dažniui), tiriant 2,5–5 mm 90 % PGD – cemento plokštę, kurios statinė orinė varža $\sigma = 81,0$ kPa·s/m², o tankis $\rho = 492,4$ kg/m³.
5. Popieriaus gamybos dumblo plokštėse naudojant gesintų kalkių rišiklį nustatyta, kad didinant PGD kiekį kompozite vidutinis garso sugerties koeficientas 250–1600 Hz dažnių ruože mažėja. Esant 50 % PGD kompozite $\alpha_{vid.} = 0,23$ –0,28, o esant 90 % PGD kompozite $\alpha_{vid.} = 0,14$ –0,18.
6. Popieriaus gamybos dumblo plokštėse naudojant molio rišiklį nustatyta, kad didinant PGD kiekį kompozite vidutinis garso sugerties koeficientas 250–1600 Hz dažnių ruože optimalią vėrtę $\alpha_{vid.} = 0,36$ –0,41 pasiekia esant 30 % molio kompozite.

7. Popieriaus gamybos dumblo plokštėse naudojant cemento rišiklį nustatyta, kad didinant PGD kiekį kompozite vidutinis garso sugerties koeficientas 250–1600 Hz dažnių ruože optimalią vertę pasiekia $\alpha_{vid.} = 0,43$ – $0,46$, esant 30 % cemento kompozite.
8. Didžiausia vidutinio garso sugerties koeficiento vertė ($\alpha_{vid.} 0,64$) oktavos dažniuose nuo 250 iki 1600 Hz nustatyta esant 5 cm oro tarpui, naudojant 70 % PGD – cemento kompozitinę plokštę. Palyginti su 1 cm storio mineralinės vatos akustine plokšte ($\alpha_{vid.} = 0,51$), PGD – cemento kompozitinės plokštės garso sugertis yra 20 % didesnė. Didinant oro tarpą iki 20 cm skirtingų PGD plokščių atvejais vidutinis garso absorbcijos koeficientas šiame dažnių diapazone mažėja 2,4–19,4 %.
9. 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 ($STI = 0,67$).

Bendrosios išvados

1. Disertacijos darbo metu buvo sudarytos 4 tyrimo metodikos. Suprojektuoti ir pagaminti statinės orinės varžos ir garso sugerties nustatymo (matavimo dažninis spektras nuo 250 iki 1600 Hz) laboratoriniai standai. Statinės orinės varžos stende gauti rezultatai buvo naudojami teoriniame tyrime. Interferometru gauti PGD kompozitinių medžiagų garso sugerties duomenys buvo lyginami su teoriniu tyrimu, remiantis rezultatais buvo kuriamas garso absorberis.
2. Atlikus PGD kompozitinių plokščių statinės orinės varžos tyrimus buvo nustatyta, kad statinė orinė varža yra atvirkščiai proporcinga PGD kiekiui medžiagoje. Didinant PGD kiekį medžiagoje statinė orinė varža mažėja eksponentiškai. Vidutinis eksponentinės funkcijos skilimo koeficientas esant 1–2,5 mm dalelėms buvo 0,22; 2,5–5 mm dalelėms 0,20; 5–10 mm dalelėms 0,16.
3. PGD plokštėms sukurti buvo naudojamos trys rišamosios medžiagos: gesintos kalkės, molis ir cementas. Nustatyta, kad PGD – gesintų kalkių kompozitų vidutinis garso sugerties efektyvumas siekė iki 28 %, PGD – molio iki 41 %, PGD – cemento iki 46 %.
4. Remiantis disertacijos tema atliktų teorinių ir eksperimentinių tyrimų duomenimis buvo sukurta garsą sugerianti konstrukcija – reguliuojamas

porėtas garso absorberis. Ši konstrukcija išsiskiria tuo, kad yra universali ir galima reguliuoti garso sugertį per dažninį spektrą. Absorberyje naudojant 70 % PGD – molio kompozitinę plokštę su 5 cm oro tarpu, garso sugerties efektyvumas 500 Hz oktavos dažnių juostoje siekia iki 95 %, o vidutinis garso sugerties efektyvumas 250–1600 Hz dažnių spektre siekia iki 55 %.

5. Atlikus patalpos, kurioje buvo naudojami reguliuojami porėti garso absorberiai, reverberacijos trukmės skaitinį modeliavimą, buvo nustatyta, kad, norint išgauti plačiajuostį reverberacijos trukmės mažinimą, reikia naudoti skirtingos konfigūracijos absorberius. Patalpų akustikos modeliavimo metu buvo nustatyta, kad, uždengus 20 % patalpos paviršių skirtingo oro tarpo absorberiais, reverberacijos trukmė gali sumažėti iki 48 %.

Rekomendacija

Remiantis disertacijos tema atliktų tyrimų rezultatais buvo sukurtas reguliuojamas porėtas garso absorberis, kuris yra paremtas PGD plokštės ir oro tarpo už jos veikimu. Šis išradimas iš kitų išsiskiria tuo, kad jis yra universalus ir optimali garso sugertis gali būti reguliuojama dažniniame spektre. Šią konstrukciją rekomenduojama taikyti įvairiose laukimo salėse, gamybinėse ir bendro naudojimo patalpose. Porėtas garso absorberis yra sudarytas iš rėmo ir PGD kompozitinės plokštės bei bėgelių sistemos, kuria slankioja plokštė. Naudojant tokią akustinę sistemą, priklausomai nuo oro tarpo, įmanoma pasiekti iki 95 % garso sugerties efektyvumą atitinkamose oktavos dažnių juostose, bendras garso sugerties efektyvumas siekia iki 55 %. Reverberacijos trukmės modeliavimu nustatyta, kad, uždengus 20 % patalpos paviršių tokia konstrukcija, reverberacijos trukmė gali sumažėti iki 48 %.

Literatūros sąrašas

- Abdullah, R., Ishak, C. F., Kadir, W. R., & Bakar, R. A. (2015). Characterization and Feasibility Assessment of Recycled Paper Mill Sludges for Land Application in Relation to the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809314>
- Allard, J. F., Depollier, C., & Guignouard, P. (1989). Free field surface impedance measurements of sound-absorbing materials with surface coatings. *Applied Acoustics*. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(89\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0003-682X(89)90053-4)
- Arenas, J. P., del Rey, R., Alba, J., & Oltra, R. (2020). Sound-absorption properties of materials made of esparto grass fibers. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su12145533>
- Asadi, M., Ohadi, A., & Keshavarz, R. (2015a). Effect of non-acoustic properties on the sound absorption of polyurethane foams. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, 1(2), 122–132. <https://doi.org/10.22064/tava.2015.15019>
- Asadi, M., Ohadi, A., & Keshavarz, R. (2015b). Effect of non-acoustic properties on the sound absorption of polyurethane foams. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, 1(2), 122–132. <https://doi.org/10.22064/tava.2015.15019>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2008). Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.2932706>

Asdrubali, F., & Horoshenkov, K. V. (2009). The Acoustic Properties of Expanded Clay Granulates. In *Building Acoustics*, Vol. 9 (pp. 85–98). <https://doi.org/10.1260/135101002760164553>

Astolfi, A., Corrado, V., & Griginis, A. (2008). Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms. *Applied Acoustics*, 69(11), 966–976. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.08.001>

Atalla, Y., & Panneton, R. (2005). Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements. In *Canadian Acoustics*.

B-a. (n.d.). *Gesintos kalkės*. <https://www.b-a.eu/p12943/kalkes-gesintos-25kg>

Bajpai, P. (2013). Recycling and Deinking of Recovered Paper. In *Recycling and Deinking of Recovered Paper*. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-00556-7>

Bajpai, P. (2015). Management of pulp and paper mill waste. In *Management of Pulp and Paper Mill Waste*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11788-1>

Bari, H., Safiuddin, M., & Salam, M. A. (2021). *Microstructure of Structural Lightweight Concrete Incorporating Coconut Shell as a Partial Replacement of Brick Aggregate and Its Influence on Compressive Strength*. <https://doi.org/10.3390/su13137157>

Baynes, A. B., & Godin, O. A. (2017). Rayleigh scattering of a cylindrical sound wave by an infinite cylinder. *Journal of the Acoustical Society of America*, 142(6). <https://doi.org/10.1121/1.5017610>

Berardi, U., & Iannace, G. (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, 94, 840–852. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.029>

Bies, D. A., & Hansen, C. H. (1980). Flow resistance information for acoustical design. *Topics in Catalysis*. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(80\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0003-682X(80)90002-X)

Billon, A., Picaut, J., & Sakout, A. (2008). Prediction of the reverberation time in high absorbent room using a modified-diffusion model. *Applied Acoustics*, 69(1), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.03.001>

Biot, M. A. (1956a). Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.1908241>

Biot, M. A. (1956b). Theory of Propagation of Elastic Waves in Fluid-Saturated Porous Solid -low frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*.

Biot, M. A. (2005). Generalized Theory of Acoustic Propagation in Porous Dissipative Media. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.1918315>

Brozovsky, J. (2014). Determine the compressive strength of calcium silicate bricks by combined nondestructive method. *Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/829794>

Buratti, C., Merli, F., & Moretti, E. (2017). Aerogel-based materials for building applications: Influence of granule size on thermal and acoustic performance. *Energy and Buildings*, 152, 472–482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.071>

Butkus, D., Kaulakys, J. ir Vabalas, P. (2005). *Fizinė aplinkos tarša: laboratoriniai darbai* [Bookitem]. Technika.

Campbell, A. G., & Tripepi, R. R. (1995). Composting and evaluating a pulp and paper sludge for use as a soil amendment/mulch. *Compost Science and Utilization*. <https://doi.org/10.1080/1065657X.1995.10701773>

Caniato, M., Bettarello, F., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, C., & Fausti, P. (2017). Thermal and acoustic performance expectations on timber buildings. *Building Acoustics*. <https://doi.org/10.1177/1351010X17740477>

Cao, L., Fu, Q., Si, Y., Ding, B., & Yu, J. (2018). Porous materials for sound absorption. *Composites Communications*, 10, 25–35. <https://doi.org/10.1016/J.COCO.2018.05.001>

Chandra, R., Yadav, S., & Yadav, S. (2017). Phytoextraction potential of heavy metals by native wetland plants growing on chlorolignin containing sludge of pulp and paper industry. *Ecological Engineering*, 98, 134–145. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.10.017>

Chawla, S. (2002). *CARA CAD and CARA CALC Room Acoustic Software*Title. https://hometheaterhifi.com/volume_9_4/cara-software-10-2002.html

Confederation of European Paper Industries. (2017). Key Statistics 2016 European Pulp & Paper Industry. In *CEPI Key Statistics 2016*.

Cox, T., & D'Antonio, P. (2009). Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. In *Design and Application*. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Cusidó, J. A., Cremades, L. V., Soriano, C., & Devant, M. (2015). Incorporation of paper sludge in clay brick formulation: Ten years of industrial experience. *Applied Clay Science*, 108, 191–198. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2015.02.027>

da Silva, G. C. C., Nunes, M. A. A., Lopes, R. V., & Júnior, A. B. A. (2013). Design and construction of a low cost impedance tube for sound absorption coefficients measurements. *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*.

Davis, L., & Mackenzie, N. (2014). Digital sound system modelling and design. *Internoise 2014*, 1–10. https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/INTERNOISE2014/papers/p474.pdf

Del Rey, R., Alba, J., Bertó, L., & Gregori, A. (2017). Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption. *Materiales de Construcción*. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.07316>

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)

Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., Guendelman, E., & Thelen, D. G. (2007). OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(11), 1940–1950. <https://doi.org/10.1109/TBME.2007.901024>

Deshpande, S. P., & Rao, M. D. (2014). Development of a Low-Cost Impedance Tube to Measure Acoustic Absorption and Transmission Loss of Materials. *121st ASEE Annual Conference & Exposition*.

Donmez Cavdar, A., Yel, H., Boran, S., & Pesman, E. (2017). Cement type composite panels manufactured using paper mill sludge as filler. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.099>

Doudart de la Grée, G. C. H., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2018). Upgrading and Evaluation of Waste Paper Sludge Ash in Eco-Lightweight Cement Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3), 04018021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002186)

Doutres, O., Atalla, N., & Dong, K. (2011). Effect of the microstructure closed pore content on the acoustic behavior of polyurethane foams. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.3631021>

Doutres, O., Atalla, N., & Dong, K. (2013). A semi-phenomenological model to predict the acoustic behavior of fully and partially reticulated polyurethane foams. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.4789595>

Doutres, O., Salissou, Y., Atalla, N., & Panneton, R. (2010a). 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>

Doutres, O., Salissou, Y., Atalla, N., & Panneton, R. (2010b). Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. *Applied Acoustics*. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.01.007>

Electrotechnical, E. C. for. (2021). *Garso sistemy įranga. 16 dalis. Objektyvus kalbos aiškumo įvertinimas pagal kalbos perdavimo indeksą (IEC 60268-16:2020)* (2021st-01–29th ed., p. 109) [Document]. Lietuvos standartizacijos departamentas.

Elwaleed, A. K., Nikabdullah, N., Nor, M. J. M., Tahir, M. F. M., & Zulkifli, R. (2013). Experimental investigation of sound absorption properties of perforated date palm fibers panel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/46/1/012027>

Figura, L. O., & Teixeira, A. A. (Eds.). (2007). *Acoustical Properties BT – Food Physics: Physical Properties — Measurement and Applications* (pp. 417–426). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34194-9_12

Figura, L., & Teixeira, A. A. (2008). *Food Physics* (1st ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34194-9>

Forouharmajd, F., & Mohammadi, Z. (2018). Experimental Study on the Effect of Air Gap, Thickness, and Density on Acoustic Impedance and Sound Absorption of Stone Wool and Rubber Samples with Transfer Function Method. *Iranian Journal of Science and Technology – Transactions of Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40997-017-0078-0>

Frank, G., Christian, E., & Dietmar, K. (2011). A novel production method for porous sound-absorbing ceramic material for high-temperature applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2009.02479.x>

Frías, 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>

Frías, M., Vegas, I., Villa, R. V. de la, & Giménez, R. G. (2011). *Recycling of Waste Paper Sludge in Cements: Characterization and Behavior of New Eco-Efficient Matrices* (Ch. 16). InTech. <https://doi.org/10.5772/20850>

Geng, X., Zhang, S. Y., & Deng, J. (2007). Characteristics of Paper Mill Sludge and Its Utilization for the Manufacture of Medium Density Fiberboard. *Wood and Fiber Science*.

Ghilahare, A. K., & Pandey, M. (2017). APPLICATION OF ENHANCED EGG CARTON, GYPSUM BOARD & SOUND DIFFUSER FOR THE PURPOSE OF ACOUSTICAL TREATMENT: AN OVERVIEW. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 04(08), 1190–1194. <https://www.irjet.net/archives/V4/i8/IRJET-V4I8213.pdf>

Gil-Reyes, B., Jeong, C. H., & Brunskog, J. (2011). Room acoustic investigation of actors' positions and orientations for various theatre configurations in a moderate-sized drama theatre. *Applied Acoustics*, 72(1), 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.08.001>

Goel, G., & Kalamdhad, A. S. (2017). An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.087>

Goel, G., & Kalamdhad, A. S. (2018). Paper mill sludge (PMS) and degraded municipal solid waste (DMSW) blended fired bricks—a review. *MOJ Civil Engineering*, 4(2), 81–85. <https://doi.org/10.15406/mojce.2018.04.00101>

He, M., & Luu, H. T. (2017). Advances in the microstructure and transport properties of random fibrous materials. *SAPEM 2017*.

Hemond, C. J. (1983). *Engineering acoustics and noise control*. Prentice-Hall.

Hernandez, D., Liu, E. J., Huang, J. H., & Liu, Y. C. (2014). Design and Construction of a Small Reverberation Chamber Applied to Absorption and Scattering Acoustic Measurements. *Advanced Materials Research*, 1077, 197–202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1077.197>

Hodgson, M., York, N., Yang, W., & Bliss, M. (2008). Comparison of predicted, measured and auralized sound fields with respect to speech intelligibility in classrooms using CATT-acoustic and ODEON. *Acta Acustica United with Acustica*, 94(6), 883–890. <https://doi.org/10.3813/AAA.918106>

I-SIMPA. (2018). *I-SIMPA*. <http://i-simpa.ifsttar.fr/>

Ingard, K. U., & Noise Control, F. (1994). Notes on sound absorption technology. In *Notebook* ;

ISO. (1991). Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance. In *Iso 9053:1991*.

ISO. (2016). *Atitikties vertinimas. Bendrieji tyrimų kokybės tikrinimo reikalavimai (ISO/IEC 17043:2010)* (2010-05-31) [Dokumentas]. Lietuvos standartizacijos departamentas.

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*. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900020006x>

Jain, M. S., Daga, M., & Kalamdhad, A. S. (2018). Composting physics: A degradation process-determining tool for industrial sludge. *Ecological Engineering*, 116, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.015>

Johnson, D. L., Koplik, J., & Dashen, R. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1017/S0022112087000727>

Kairytė, A. (2017). *Biopoliuretano putų, modifikuotų popieriaus gamybos atliekomis, tyrimai*. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas.

Kim, S., Kim, H. J., & Park, J. C. (2009). Application of recycled paper sludge and biomass materials in manufacture of green composite pallet. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.021>

Koizumi, T., Tsujiuchi, N., & Adachi, A. (2002). The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. *High Performance Structures and Composites*. <https://doi.org/10.2495/HPS020161>

Küçük, M., & Korkmaz, Y. (2016). Sound absorption properties of acrylic carpets. *The Journal of The Textile Institute*. <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1254582>

Kumar, S., & Lee, H. P. (2020). Recent Advances in Acoustic Metamaterials for Simultaneous Sound Attenuation and Air Ventilation Performances. *Crystals*, 10(8), 686. <https://doi.org/10.3390/cryst10080686>

Leccese, F., Rocca, M., & Salvadori, G. (2018). Fast estimation of Speech Transmission Index using the Reverberation Time: Comparison between predictive equations for educational rooms of different sizes. *Applied Acoustics*, 140, 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.05.019>

Leclaire, P. (2017). Ultrasonic characterization of porous materials. *Denorms Training School 3 „Experimental Techniques for Acoustic Porous Materials and Metamaterials*.

Lietuvos statistikos departamentas. (2019). *Lietuvos statistikos metraštis (2019 m. leidimas)*. *Pramonė*. <https://osp.stat.gov.lt/lietuvas-statistikos-metrastis/lsm-2019/verslas/pramone>

Liu, Y., & Jacobsen, F. (2005). Measurement of absorption with a p-u sound intensity probe in an impedance tube. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(4), 2117–2120. <https://doi.org/10.1121/1.2010387>

LR aplinkos ministerija. (2001). LAND 20-2001 „Nuotėkų dumblo naudojimo tręšimui reikalavimai“. *Valstybės Žinios*, 61(2196).

Luo, X., Li, W., Jin, X., & Zeng, L. (2011). Effects of porosity and pore size on sound absorption characteristic of ceramicsite porous material. *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society*.

Mamtaz, H., Hosseini Fouladi, M., Nuawi, M. Z., Narayana Namasivayam, S., Ghassem, M., & Al-Atabi, M. (2017). Acoustic absorption of fibro-granular composite with cylindrical grains. *Applied Acoustics*, 126, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.05.012>

Matyka, M., Khalili, A., & Koza, Z. (2008). Tortuosity-porosity relation in porous media flow. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.026306>

Mcneer, R. R., Bennett, C. L., Horn, D. B., & Dudaryk, R. (2017). Factors affecting acoustics and speech intelligibility in the operating room: Size matters. In *Anesthesia and Analgesia*, Vol. 124, Issue 6 (pp. 1978–1985). <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002118>

Meissner, M. (2008). Influence of wall absorption on low-frequency dependence of reverberation time in room of irregular shape. *Applied Acoustics*, 69(7), 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.02.004>

Migneault, S., Koubaa, A., Nadji, H., Riedl, B., Zhang, S. Y., & Deng, J. (2010). Medium-Density Fiberboard Produced Using Pulp and Paper Sludge from Different Pulping Processes. *Wood and Fiber Science*, 42(3), 292–303.

Migneault, Sebastien, Koubaa, Ahmed, Riedl, & Bernard. (2011). Binderless Fiberboard Made From Primary and Secondary Pulp and Paper Sludge. *Wood and Fiber Science*.

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>

Muhammad, M. M., Sa’at, N., Nain, H., Isa, M., Hassanuddin, N., & Din Yati, M. S.

(2012). The Effect of Air Gap Thickness on Sound Absorption Coefficient of Polyurethane Foam. *Defence S and T Technical Bulletin*, 5, 176–187.

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*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.060>

Mvubu, M. B., Anandjiwala, R., & Patnaik, A. (2019). Effects of air gap, fibre type and blend ratio on sound absorption performance of needle-punched non-woven fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. <https://doi.org/10.1177/1558925019840874>

Naylor, G. M. (1993). ODEON-Another hybrid room acoustical model. *Applied Acoustics*, 38(2–4), 131–143. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(93\)90047-A](https://doi.org/10.1016/0003-682X(93)90047-A)

Neubauer, R., & Kostek, B. (2001). Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms With Non-Uniformly Distributed Sound Absorption. *Archives of Acoustics*, 26(3), 183–201.

Nowak, R., Kania, T., Derkach, V., Orłowicz, R., Halaliuk, A., Ekiert, E., & Jaworski, R. (2021). Strength Parameters of Clay Brick Walls with Various Directions of Force. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 6461 (21), 6461. <https://doi.org/10.3390/MA14216461>

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>

Oancea, I., Bujoreanu, C., Budescu, M., Benchea, M., & Grădinaru, C. M. (2018). Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.273>

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*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.02.005>

Or, K. H., Putra, A., & Selamat, M. Z. (2017). Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber. *Applied Acoustics*, 119, 9–16. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2016.12.002>

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*.

Panneton, R., & Olny, X. (2006). Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.2169923>

Pera, J., & Amrouz, A. (1998). Development of Highly Reactive Metakaolin from Paper Sludge. *Advanced Cement Based Materials*, 7(2), 49–56. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00016-3](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00016-3)

Pfretzschner, J., & Jaime. (2002). *Rubber crumb as granular absorptive acoustic material*.

<http://hdl.handle.net/10261/7999>

Picaud, J., & Fortin, N. (2012). I-Simpa, a graphical user interface devoted to host 3D sound propagation numerical codes. *Acoustics 2012*, 9–14. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00810893%0D>

Pokhrel, D., & Viraraghavan, T. (2004). Treatment of pulp and paper mill wastewater - A review. In *Science of the Total Environment*. <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(Icbee 2013), 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.apcb.2014.01.012>

Putra, A., Or, K. H., Selamat, M. Z., Nor, M. J. M., Hassan, M. H., & Prasetyo, I. (2018). Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres. *Applied Acoustics*, 136, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.01.029>

Queiroz de Sant'Ana, D., & Trombetta Zannin, P. H. (2011). Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ measurements of reverberation time, definition, and computer-predicted speech transmission index. *Building and Environment*, 46(2), 511–517. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.015>

Raut, S. P., Sedmake, R., Dhunde, S., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2012). Reuse of recycle paper mill waste in energy absorbing light weight bricks. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.053>

Rindel, J. H. (2000). The use of computer modeling in room acoustics. *Journal of Vibroengineering - Paper of the International Conference BALTIC-ACOUSTIC 2000*, 3(4), 219–224. <https://doi.org/10.1.1.33.6210>

Rodríguez Largo, O., Vigil De La Villa, R., Sánchez De Rojas, M. I., & Frías, M. (2009). Novel Use of Kaolin Wastes in Blended Cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(10), 2443–2446. <https://doi.org/10.1111/J.1551-2916.2009.03231.X>

Sabine, W. C., & Dwight, C. H. (1966). Collected Papers on Acoustics. *American Journal of Physics*, 34(4), 370–371. <https://doi.org/10.1119/1.1972994>

Sakagami, K., Okuzono, T., Somatomo, Y., Funahashi, K., & Toyoda, M. (2019). A Basic Study on a Rectangular Plane Space Sound Absorber Using Permeable Membranes. *Sustainability*, 11(7), 2185. <https://doi.org/10.3390/su11072185>

Samya Saha, A., & Mahmud Amanat, K. (n.d.). *Rebound hammer test to predict in-situ strength of concrete using recycled concrete aggregates, brick chips and stone chips*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121088>

Sarkar, R., Kurar, R., Gupta, A. K., Mudgal, A., & Gupta, V. (2017). Use of paper mill waste for brick making. *Cogent Engineering*. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1405768>

Seddeq, H. S. (2009). Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*.

Setton, P. (2017). An Open Source Noise Calculation Toolkit for Acoustics. *Acoustics 2017*, 9. https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2017/papers/p43.pdf

Shao, J., Yuan, X., Leng, L., Huang, H., Jiang, L., Wang, H., Chen, X., & Zeng, G. (2015). The comparison of the migration and transformation behavior of heavy metals during pyrolysis and liquefaction of municipal sewage sludge, paper mill sludge, and slaughterhouse sludge. *Bioresource Technology*, 198, 16–22. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.08.147>

Soft dB. (n.d.). *What is Reverberation in Acoustical Analysis?* <https://www.softdb.com/what-is-reverberation-in-acoustical-analysis/>

Soucy, J., Koubaa, A., Migneault, S., & Riedl, B. (2014). The potential of paper mill sludge for wood-plastic composites. *Industrial Crops and Products*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.013>

Suhanek, M., Jambrosic, K., & Domitrovic, H. (2008). Student project of building an impedance tube. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.2934823>

Sutcu, M., & Akkurt, S. (2009). The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.02.027>

Sutcu, M., Akkurt, S., Bayram, A., & Uluca, U. (2012). Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.08.027>

Taban, E., Khavanin, A., Faridan, M., Samaei, S. E., Samimi, K., & Rashidi, R. (2020). Comparison of acoustic absorption characteristics of coir and date palm fibers: experimental and analytical study of green composites. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02304-8>

Taban, E., Valipour, F., Abdi, D. D., & Amininasab, S. (2020). Mathematical and experimental investigation of sound absorption behavior of sustainable kenaf fiber at low frequency. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03024-0>

Tang, S. K., & Yeung, M. H. (2004). Speech transmission index or rapid speech transmission index for classrooms? A designer's point of view. *Journal of Sound and Vibration*, 276(1–2), 431–439. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.10.036>

Tang, X., & Yan, X. (2017). Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 360–380. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.07.002>

Taraldsen, G. (2005). The Delany-Bazley Impedance Model and Darcy's Law. *Acta Acustica United with Acustica*, 91, 41–50.

Tarnow, V. (2002). Measured anisotropic air flow resistivity and sound attenuation of glass wool. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(6), 2735–2739.

<https://doi.org/10.1121/1.1476686>

Thomas, M. R. (2017). *Wayverb: A Graphical Tool for Hybrid Room Acoustics Simulation*. <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/33919/#.Wu7kmz8KKYQ.mendeley>

Ulrich, T., & Arenas, J. P. (2020). Sound absorption of sustainable polymer nanofibrous thin membranes bonded to a bulk porous material. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su12062361>

Umnova, O., Attenborough, K., Shin, H. C., & Cummings, A. (2005). Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials. *Applied Acoustics*, 66(6), 607–624. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.02.005>

Veluchamy, C., & Kalamdhad, A. S. (2017). Enhanced methane production and its kinetics model of thermally pretreated lignocellulose waste material. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.068>

Veluchamy, C., Raju, V. W., & Kalamdhad, A. S. (2017). Prerequisite – An electrohydrolysis pretreatment for anaerobic digestion of lignocellulose waste material. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.137>

Vieira, C. M. F., Pinheiro, R. M., Rodriguez, R. J. S., Candido, V. S., & Monteiro, S. N. (2016). Clay bricks added with effluent sludge from paper industry: Technical, economical and environmental benefits. *Applied Clay Science*. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.001>

Vigil de la Villa, R., Frías, M., Sánchez de Rojas, M. I., Vegas, I., & García, R. (2007). Mineralogical and morphological changes of calcined paper sludge at different temperatures and retention in furnace. *Applied Clay Science*, 36(4), 279–286. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2006.10.001>

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). <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10419-10432>

West, J. C., Dixon, J. N., Nourshamsi, N., Das, D. K., & Bunting, C. F. (2018). Best Practices in Measuring the Quality Factor of a Reverberation Chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. <https://doi.org/10.1109/TEM.2017.2753724>

Yang, W., & Hodgson, M. (2007). Ceiling baffles and reflectors for controlling lecture-room sound for speech intelligibility. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(6), 3517. <https://doi.org/10.1121/1.2730623>

Zunaidi, N. H., Tan, W. H., Majid, M. S. A., & Lim, E. A. (2017). Effect of physical properties of natural fibre on the sound absorption coefficient. *Journal of Physics: Conference Series*, 908, 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/908/1/012023>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Astrauskas, T., Picó, R., Sánchez-Morcillo, V. J., & Grubliauskas, R. (2021). Acoustic panels based on recycled paper sludge and lime composites. *International journal of environmental science and technology*, 19, 1593–1600 (Clarivate Analytics Web of Science, DOI: 10.1007/s13762-021-03209-1).

Astrauskas, T., Januševičius, T., & Grubliauskas, R. 2021. Acoustic panels made of paper sludge and clay composites. *Sustainability: Section: Sustainable materials*, 13(2), 637, 1–10 (Clarivate Analytics Web of Science, DOI: 10.3390/su13020637).

Astrauskas, T., & Grubliauskas, R. (2020). Method to recycle paper sludge waste: production of panels for sound absorption applications. *Environmental and climate technologies*, 364-372 (Clarivate Analytics Web of Science, DOI: 10.2478/rtuect-2020-0109)

Straipsniai kituose leidiniuose

Astrauskas, T., & Grubliauskas, R. (2020). Modelling of incident wave sound absorption coefficient of paper sludge panels. *11th International conference “Environmental Engineering”*, 21-22 May 2020, Vilnius Gediminas Technical University, 1–7. Conference Proceedings Citation Index - Science (Web of Science), DOI: 10.3846/enviro.2020.820.

Astrauskas, T., & Grubliauskas, R. (2021). Acoustic composite panels based on recycled paper sludge. *Advances in acoustics, noise and vibration – 2021: Proceedings of the 27th international congress on sound and vibration (ICSV27), 11–16 July 2021*. 1–7 (Scopus)

Astrauskas, T. ir Grubliauskas, R. (2019). Granuliuotų medžiagų garso sugerties prognozavimas ir vertinimas. 22-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija „Aplinkos apsaugos inžinerija“, 2019 m. kovo 20 d. Vilnius, 18–24 (Index Copernicus, DOI: 10.3846/aainz.2019.022).

Astrauskas, T., ir Grubliauskas, R. Garsą sugeriančių plokščių paviršiaus ploto įtakos patalpos aidėjimo trukmei vertinimas. 21-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija „Aplinkos apsaugos inžinerija“, 2018 m. kovo 20 d. Vilnius, 130–136 (DOI: 10.3846/aainz.2018.020).

Patentai

Astrauskas, T. (išrad.) ir Grubliauskas, R. (išrad.). 2022. *Reguliuojamas porėtas garso absorberis*. Lietuvos patentas Nr. 6879. Lietuvos Respublikos patentų duomenų bazė.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Paper sludge presents an immense problem in the paper industry. Increasingly more attention is given to this waste management, and scientists are looking for ways to use it more efficiently. The growing economy and consumption face the waste management problem. Paper production results in paper sludge (PS) as a by-product, currently considered waste and either taken to landfills or waste incineration plants. The European Union produces 32.5 million tonnes of paper sludge annually, and 20% of it ends up in landfills.

The thesis addresses the problem of room reverberation by using paper production sludge and contributes to solving the waste reuse and sludge accumulation problems.

The reverberation time in a room is a parameter determining the sound quality of the room environment. This setting is particularly noteworthy for designers of concert halls, cinemas, and public transport stations. The longer the reverberation time, the poorer the acoustic environment, which has a detrimental effect on signal (speech message) transmission and comprehension. Reverberation time as a phenomenon is usually studied in large rooms, halls, churches, arenas. However, it is also important for small rooms. Increased sound absorption in a room improves its acoustic environment, allowing people to enjoy better quality sound while listening to music or watching a movie.

Relevance of the thesis

Reducing noise (unwanted sounds) and improving indoor sound quality mostly relate to sound-absorbing materials. The development of sound-absorbing materials is one of the most widely studied fields of acoustics. In this field, natural or recycled raw materials are becoming increasingly important. Scientists develop such materials in Canada (R. Panneton), Spain (J. Alba), Chile (J. P. Arenas), England (K. V. Horoshenkov) and other countries, constantly seeking new, more effective measures to reduce noise and improve indoor sound quality. The reverberation time of a room is the main parameter determining the sound quality in a room. This room parameter is decisive for the transmission of the speech signal. Adequate reverberation time is important in concert halls, cinemas and various waiting rooms where different speech information is presented. The reverberation time parameter is directly related to the ability of sound-absorbing materials to soak up sound and its area in the room.

The 2020 Communication from the European Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions “A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe” calls to avoid waste or use it as a resource. Attention should be focused on waste recycling, reuse or recovery. Paper production is a complex field consisting of many multi-stage processes that result in a variety of products and, at the same time, generate significant amounts of various waste, such as recycled paper sludge waste and de-inking sludge waste (water-treatment sludge).

This work aims to create a new sound-absorbing panel based on paper sludge, integrated into a sound absorber to contribute to solving room acoustics problems.

The object of research

The research object is composite panels based on paper sludge and sound absorber.

The aim of the thesis

Based on data of theoretical, experimental and numerical modelling study results, to develop the sound absorber with paper sludge composite panels for sound absorption applications.

The tasks of the thesis

1. Design and build the equipment for measuring the material static air flow resistivity and sound absorption.
2. Test and investigate the static air flow resistivity (σ) of paper sludge composite panels, evaluate the loose granular PS grain size and different binding materials effect on static air flow resistivity
3. Perform theoretical research on sound absorption (α) of paper sludge composite panels to enrich the experimental data.
4. Characterise the sound absorption (α) of paper sludge by estimating the influence of the amount of a binder and air gap.

5. According to the gained data, design the adjustable porous sound absorber; evaluate the effectiveness in case of reverberation time mitigation using *Odeon* software.

Research methodology

The study used the transfer function method for determining the sound absorption coefficient (α) of materials in an impedance tube according to ISO 10534-2. Material static air flow resistivity tests were performed according to ISO 9053. The Delany–Bazley–Miki theoretical-physical model was used to predict experimental research results. Grain size analysis was performed using sieves. *Odeon* software was used to model reverberation time and speech transmission index.

Scientific novelty of the thesis

Sound-absorbing composite panels were developed with papermaking sludge as the main material. The air resistance and sound absorption of such panels were characterised by estimating the amount of papermaking sludge in the composite, and an adjustable porous sound absorber was used for sound absorption applications.

Practical significance of the research findings

The use of paper production sludge as a key raw material in the production of composite panels could contribute to reducing the accumulation of paper sludge in mills.

The research results can be used to predict the reverberation times of different purpose rooms for various purposes. According to the research data, it is possible to choose the construction of a building element that is partially made of waste (50–90% of paper production sludge composite), thus reducing the waste problem in Lithuania and the European Union.

Defended statements

1. Increasing the amount of paper sludge in the composite sound-absorbing panel from 50% to 90% reduces the static air flow resistivity up to 3.5 times.
2. The optimal PS content of a sound-absorbing panel using clay or cement as binders is 70 wt%.
3. When using PS composite panel, a 5 cm air gap increases the average sound absorption coefficient ($\alpha_{\text{avg.}}$) by $41 \pm 19\%$ in the frequency range from 250 to 1600 Hz.

Approval of the research findings

Seven scientific articles were published on the dissertation topic: three in scientific journals included in the Thomson ISI list (Astrauskas, Januševičius et al., 2021; Astrauskas, Picó et al., 2021; Astrauskas, Grubliauskas, 2020b); in other databases referenced in peer-reviewed scientific journals (Astrauskas & Grubliauskas, 2019, 2021); and one conference paper (Astrauskas & Grubliauskas, 2020a). The patent of the Republic of Lithuania was obtained for “Adjustable porous sound absorber”, patent number LT 6879 B (Astrauskas, Grubliauskas, 2022).

The research results were published in six scientific conferences in Lithuania and abroad:

- Conferences of young researchers “Science — the Future of Lithuania”. Environmental Engineering. 2018–2021, Vilnius.
- International conference “Conference on Environment and Climate Technology”. 2020, Riga (online).
- 27th International Congress on Sound and Vibration. 2021, Prague (Online).

Internship at the Polytechnic University of Valencia, Spain, September–November 2020. The dissertation was presented on 19 May 2021 during the seminar of the State Research Institute, Center for Physical and Technological Sciences.

The structure of the dissertation

The dissertation consists of the introduction, three chapters, the general conclusion and recommendation, references and the author’s publications on the dissertation topic. The dissertation has 119 pages, excluding annexes, 30 numbered equations, 53 figures and 16 tables. The author used 137 literature sources and seven author publications.

Acknowledgements

A doctoral dissertation is impossible without other contributors. First, I would like to thank my supervisor, Assoc. Prof. Dr Raimondas Grubliauskas for the opportunity and confidence to pursue a doctorate in environmental engineering science field. I am very thankful for his support and guidance during the preparation of the dissertation.

Together with Assoc. Prof. Dr Tomas Januševičius, through the scientific discussions, they guided me in the right direction to achieving the dissertation goal, for which I am genuinely grateful to them.

My sincere gratitude is also extended to Dr Victor Sanchez-Morcillo and Dr Ruben Pico-Vila for their assistance during the internship in Valencia Polytechnical University, Spain.

Also, I truly appreciate the generous help of all my former and current colleagues at the laboratory, who offered theoretical advice and became not only co-workers but also friends.

Finally, I want to recognise my family for their continuous support during my doctoral studies.

1. THE ANALYSIS OF THE RESEARCH ON PAPER SLUDGE USAGE AND SOUND PROPAGATION

The paper industry is among the most polluting industrial sectors. It is described as one of the largest energy and water consumers (Pokhrel and Viraraghavan, 2004). Paper sludge is created during the wastewater treatment process, and its amount ranges from 0.3 to 1 m³ of sludge per 1 t of manufactured paper (Priadi et al., 2014).

Various types of solid waste and sludge are generated at different stages of the technological process. The main source of sludge is mechanical and biological wastewater treatment. Solid waste and sludge from paper production can be divided into:

- Primary sludge (recycled paper waste). This sludge is collected by gravity sedimentation. Primary sludge contains lignocellulosic components (cellulose, hemicellulose and lignin), papermaking fillers (kaolin and calcium carbonate) (Ochoa de Alda, 2008; Kairytė, 2017).

- Secondary sludge (Ink Sewage Sludge). This type of sludge consists of short fibres or fibre particles, ink particles (a potential source of heavy metals), residues from paper recycling and paint removal solutions. This sludge is generated by recycling paper. Paints and other impurities are separated during processing by flotation. Ink removal sludge contains paint, cellulose fibres, small fibre particles that are not “caught” by filters (Jackson et al., 2000; Monte et al., 2009).

Paper sludge is a complex mixture of different materials. It consists of recycled paper fibre, inorganic solids, and chemical additives that have been used in paper production (Bajpai, 2015). Papermaking sludge can be divided into organic and inorganic. The part of sludge largely composed of calcite is considered inorganic, and the part of paper sludge composed of cellulose and lignin is considered organic (Wang et al., 2016).

One of the ways to use paper sludge is in cement–wood composite panels. The scientific literature deals with panels made of oak–pine and paper production sludge fibres, paper production sludge wood–plastic composites, cement boards. However, the boards do not have high mechanical strength, and the optimal amount of sludge in paper production is only 10% of the total weight (Goel, Kalamdhad, 2018).

While there are several studies (Donmez Cavdar et al., 2017; Kim et al., 2009) concerning the mechanical properties of paper sludge composite materials, their acoustic properties are still poorly known. This dissertation work aims to characterise the sound absorption properties of composites based on PS waste. Also, it proposes a method to produce acoustic panels based on PS composites.

2. Methods of acoustic and non-acoustic properties characterisation of paper sludge and method for numerical modelling of reverberation time

The paper sludge was taken from the paper production company and was stored at an open storage site. It was taken from different sides of the pile and mixed.

Before preparing any samples, the raw material was dried at 60 °C for seven days. Then, the dried sludge was crushed with a gill crusher (gill diameter adjustable from 2 to 15 mm) and sorted. The total particle size distribution was determined.

Samples were prepared using three different sizes of PS particles (5–10 mm, 2.5–5 mm, 1–2.5 mm). Composite materials were formed using such binding materials as slaked lime, clay, cement. Various composites of these materials are often used in the construction sector. Composite panels were fabricated using different binders under the same methodology.

Aiming for the material’s homogeneity, a perforated mould was created to allow diffuse water removal. The polylactic acid mould was made using a 3D printer. In the mould, the sample was pressurised to 50 Pa (corresponding to the mass of the sample) at a drying temperature of 35 °C. To ensure an even distribution of the binder in the material during the drying period of the sample, the samples were flipped every 24 hours. The

thickness of the produced samples was not constant due to different shrinkage properties of the binders; the thickness of the samples was 14 ± 3 mm.

The experimental study relied on methods of standard air flow resistivity (ISO 9053-1) and determination of incident wave sound absorption, transfer function (ISO 10534-2). Laboratory equipment was built to implement the experimental methods.

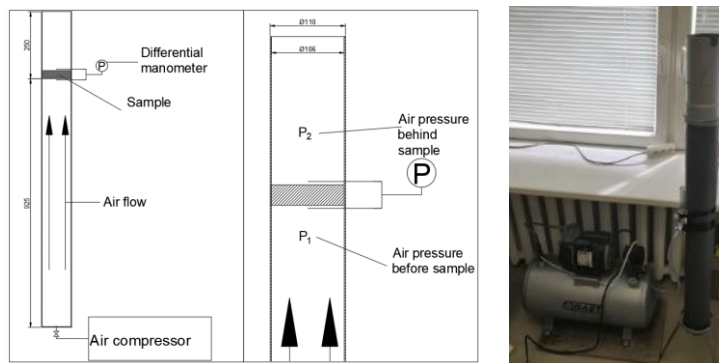


Fig. S2.1. Air flow resistivity measurement system used in the study

The air flow resistivity of paper sludge composite panels was measured in an air-pressurised tube. The measurement system of static air flow resistivity is presented in Fig. S2.1. The air flow speed and air pressure difference were measured directly in this method. Air flow resistivity σ was calculated afterwards. All calculations were made according to the ISO 9053-1 standard.



Fig. S2.2. Impedance tube system used in the study

Sound absorption of the paper sludge composite panels was measured using an impedance tube (Fig. S2.2) system. The used measuring system consisted of a square tube (internal dimensions 10 cm x 10 cm), two microphones (1/2 inch in diameter), a sound source (10 cm in diameter), a sound card (signal processing system), a computer program for recording results and processing). Such a measuring system provides accurate results in the 250–1600 Hz frequency range.

The experimental sound absorption results were predicted using the Delany–Bazley–Miki physical model. Based on this model, by knowing the static air flow resistivity of a material, its acoustic impedance is determined. Therefore, the sound absorption coefficient can be predicted (Delany, Bazley, 1970; Miki, 1990). This model predicts the normal incidence sound absorption coefficient.

3. Results and analysis of acoustic and non acoustic properties characterisation of paper sludge and method for numerical modelling of reverberation time

This chapter presents experimental air flow resistivity, sound absorption and theoretical study results. Also, the chapter introduces the sound-absorbing construction that was developed based on research results.

Table S3.1. Air flow resistivity of PS composite panels with slaked lime binders

Binder	PS quantity in the composite, %	1.0–2.5 mm grain size, $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	2.5–5 mm grain size, $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	5–10 mm grain size, $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
Slaked lime	50	175.6	161.0	379.8
	60	162.3	120.3	215.3
	70	101.4	90.1	172.7
	80	81.0	60.3	130.5
	90	49.6	57.3	115.8
Clay	50	181.3	278.1	120.4
	60	162.2	235.6	95.2
	70	83.4	98.7	83.4
	80	80.7	82.6	74.5
Cement	50	137.5	109.5	163.5
	60	122.3	105.0	153.4
	70	71.5	96.2	139.4
	80	64.2	85.8	127.5
	90	58.6	81.0	114.6

The static air flow resistivity of the paper sludge panel depends on the binder quantity in the panel.

Table S3.1 shows the air flow resistivity test results for different composite panels with three different binders used in this study. Studies have shown that the air flow resistivity decreases by reducing the amount of binder in the composite. The assessment of the static air flow resistivity of the composite panels of the same grain size found that the highest static air flow resistivity was in the composition containing 50% of the binding material and the lowest – containing 10%. No dependence was found of static air flow resistivity on the PS grain size.

Firstly, all the PS composite panels were tested to find the optimal sound absorption. All these panels were measured without an air gap behind the panel.

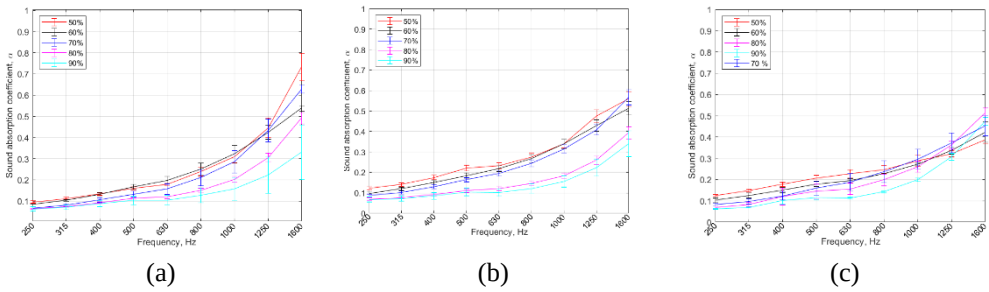


Fig. S3.1. Sound absorption of different PS composite panels using slaked lime binder: (a) 1–2.5 mm grain size, (b) 2.5–5 mm grain size, (c) 5–10 mm grain size

The differences in sound absorption between the samples of grain size of 5–10 mm vary within a margin of error. The binder content of these composites does not cause structural changes that would affect the sound absorption. In the case of samples with smaller grain sizes (1–2.5 mm; 2.5–5 mm), it was observed that the sound absorption coefficient values and the quantity of paper sludge were inversely proportional. As the PS amount decreases in the composite, the sound absorption coefficients increase. Regardless of the composite's particle size or PS ratio, the difference in the low octave frequency bands (250–500 Hz) is minimal, only within the error limits. At higher frequencies, sound absorption increases with decreasing PS in the composite.

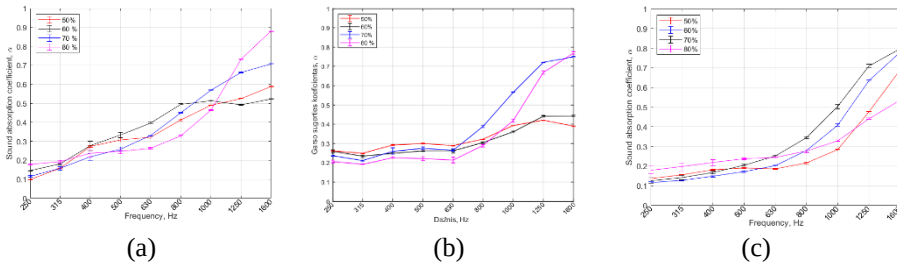


Fig. S3.2. Sound absorption of different PS composite panels using clay binder: (a) 1–2.5 mm grain size, (b) 2.5–5 mm grain size, (c) 5–10 mm grain size

Fig. S3.2 presents the sound absorption of different PS and clay composite panels. The PS and clay composite panels of different grain sizes showed different behaviour. The PS panels with smaller grain sizes showed higher sound absorption in low and mid frequencies, while others showed higher sound absorption coefficient values in higher frequencies. The compactivity of the samples could justify such a result. Smaller grain size samples are more compact and denser, which leads to higher density values and, eventually, to higher sound absorption values under lower frequencies (250–800 Hz).

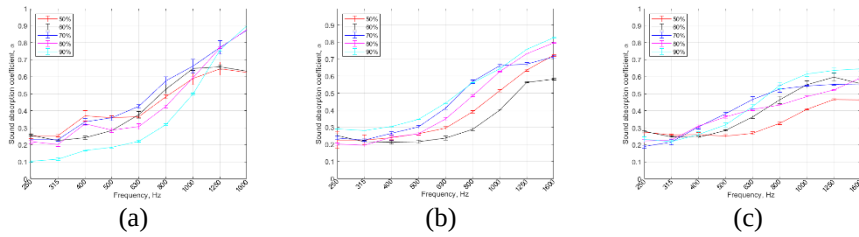


Fig. S3.3. Sound absorption of different PS composite panels using cement binder: (a) 1–2.5 mm grain size, (b) 2.5–5 mm grain size, (c) 5–10 mm grain size

Fig. S3.3 shows the sound absorption curves of PS and cement composites in the frequency range from 250 to 1600 Hz. More PS in the composite decreases the total density of the composite, affecting the sound absorption at low and medium frequencies. As the density could be linked to the porosity of the material, likely, the porosity of the samples with 80–90% PS is higher, so composites with less binder (cement) are more porous. The porosity of a material is a parameter that affects sound absorption at higher frequencies.

The study was continued by introducing an air gap between sound-absorbing panels and rigid backing and later compared with commercial products available on the market. The air gap changed in steps of 5 cm up to 20 cm.

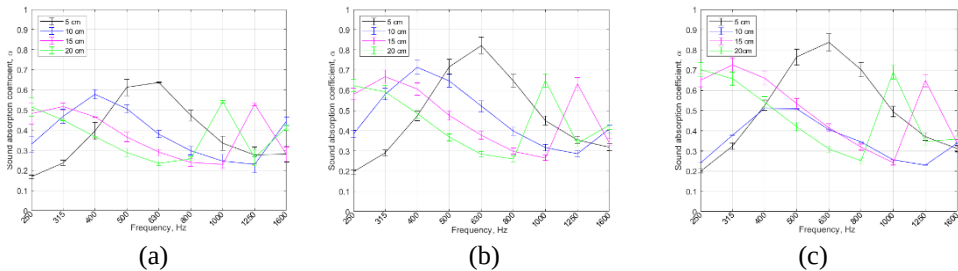


Fig. S3.4. Sound absorption with air gap (binder — slaked lime): (a) 1–2.5 mm 50% PS; (b) 2–5 mm 50% PS; (c) 5–10 mm 70% PS

The sound absorption coefficients depend on the size of the air gap. All the studied cases found that introducing an air gap into the acoustic system increased the values of sound absorption coefficients, but there were frequency zones with high or low sound absorption values because of positive or negative wave interferences. Such phenomena occur when the PS panels act as a membrane. Thickening (enlarging the air gap) of the acoustic system shifts the peaks of sound absorption to lower frequencies, which is very important in the design for applications for sound absorption. If the thickness of the acoustic system is increased, this system can absorb lower frequency sounds. The sound absorption minima are obtained in the higher octave frequency bands because the acoustic system starts to act as a resonator at those frequencies, and when the sound resonance occurs in the acoustic system, the sound absorption decreases.

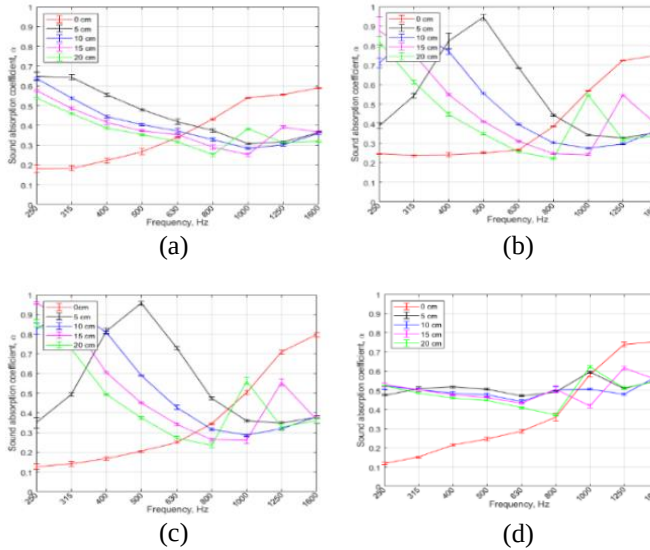


Fig. S3.5. Sound absorption with air gap (binder — clay): (a) 1–2.5 mm 50% PS; (b) 2.5–5 mm 70% PS; (c) 5–10 mm 70% PS; (d) reference mineral wool panel

Fig. S3.5 demonstrates the sound absorption using different amounts of air space behind the samples. Using samples of 1–2.5 mm 50% PS and commercial mineral wool (Fig. S3.5 a, d), achieved no visible wave interferences within the measured frequency range, resulting in more stable but lower sound absorption coefficient values within the measured frequency range. Such phenomena are influenced by the sample absorbing certain frequency waves, and as a result, there is no standing wave to interfere. However, such phenomena were found only with 1–2.5 mm grain size and mineral wool samples, denser than the other two samples. Other samples showed resonances that were clearly seen (Fig. S3.5 b, c). Such peak values are typically seen in $\frac{1}{4}$ wavelength when the air gap is present in the acoustic system. The frequency of the peak value depends on the thickness of the air gap. The peak sound absorption values shifted to lower frequencies when the air gap thickness increased, and the peak values of 15 and 20 cm of the air gap could not be seen using this measurement system. From the standpoint of room-acoustics engineering, the 500 Hz octave band frequency is one of the most important. Such panels show the potential to be used for reducing the reverberation time of a room.

Fig. S3.6 shows the effect of an air gap when PS and cement composite panels are used. As in the case of slaked lime and clay composite panels, negative wave interference occurs in the acoustic system, resulting in a sound absorption peak in a certain octave frequency band. The location of the maximum sound absorption in the frequency spectrum of such acoustic systems depends on the air gap size between the sound-absorbing plate and the reflecting surface. It has been observed that such acoustic systems act in part as membrane absorbers. The PS composite panel is not rigid and, therefore, vibrates, causing

the acoustic system to resonate. Therefore, in the presence of an air gap, sound absorption increases in a rather narrow range of octave frequencies.

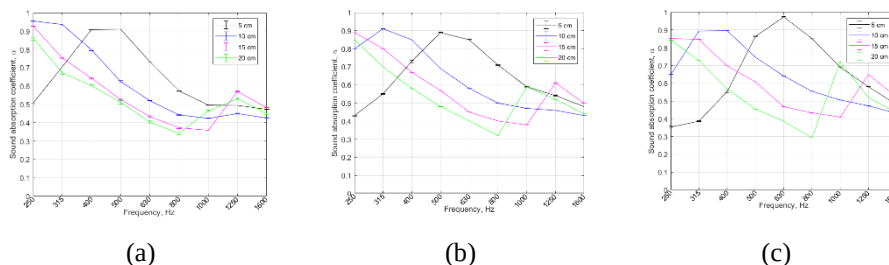


Fig. S3.6. Sound absorption with air gap (binder — cement): (a) 1–2.5 mm 70% PS; (b) 2.5–5 mm 70% PS; (c) 5–10 mm 70% PS

Due to the equipment limitations in measured frequencies, the calculation of the weighted sound absorption coefficient is impossible. To directly compare these panels, it was decided to use the average value of the sound absorption coefficient of the measured frequency bands.

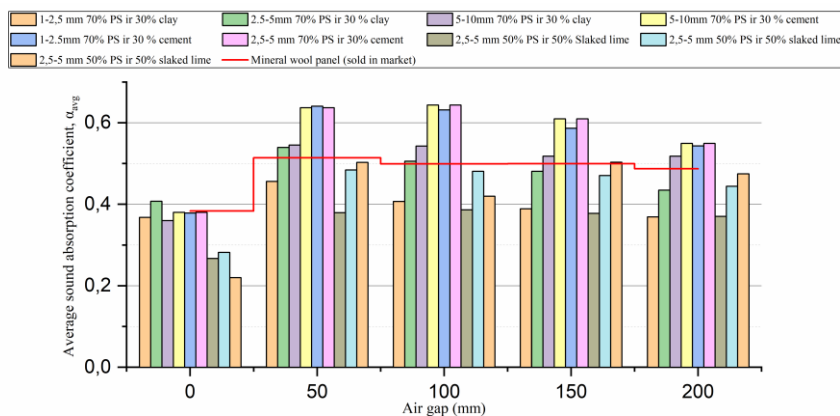


Fig. S3.7. Average sound absorption values at the frequency range of 250–1600 Hz

Fig. S3.7 is a graph showing the average sound absorption coefficient as a function of the air gap behind the sample. This graph shows that the optimal sound absorption is at a distance of 50 mm from the sample, regardless of the sample. Although the 1–2.5 mm 50% PS sample with cement showed relatively low sound absorption without an air gap ($\alpha_{\text{avg}} = 0.36$), all other configurations showed the highest average sound absorption values (α_{avg} up to 0.55). Such results indicate the potential use of PS composites for acoustic purposes. Compared to the results with a commercially produced acoustic panel (α_{avg} up to 0.51), PS and clay composite panels showed similar or slightly better acoustic

performance (α_{avg} up to 0.53) while cement composites with 70% PS showed even higher values (α_{avg} up to 0.64). The sound absorption of PS and slaked lime composite panels in the presence and absence of air gap showed lower values than the commercially produced sound-absorbing panel.

The theoretical study using the Delany–Bazley–Miki model was done due to small differences in panel thickness, which cannot be avoided, thus influencing sound absorption data. The chosen sample thickness was constant (12 mm) to remove such uncertainty for this theoretical study. Also, theoretically, it is possible to predict the sound absorption of PS panels in a wider frequency range.

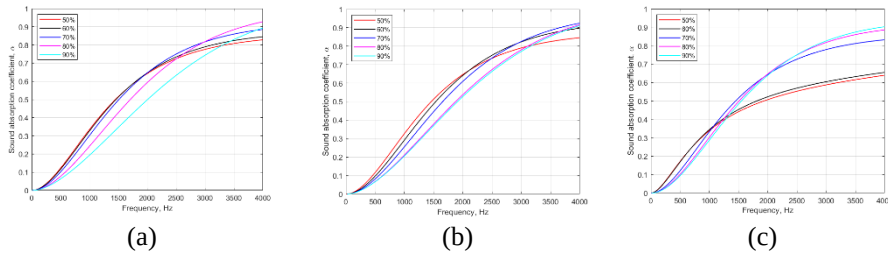


Fig S3.8. Prediction of PS and slaked lime panels sound absorption: (a) 1–2.5 mm; (b) 2–5 mm; (c) 5–10 mm

Fig. S3.8 shows the results of the theoretical prediction of slaked lime and PS composite panels. Experimental air flow resistivity results were used to predict sound absorption. Similar to the experimental results, at low and medium frequencies (0–1500 Hz), the sound absorption is higher with a higher amount of binder, but at higher frequencies, an inverse relationship is observed as the air resistance decreases (as does the amount of binder in the composite), the sound absorption increases.

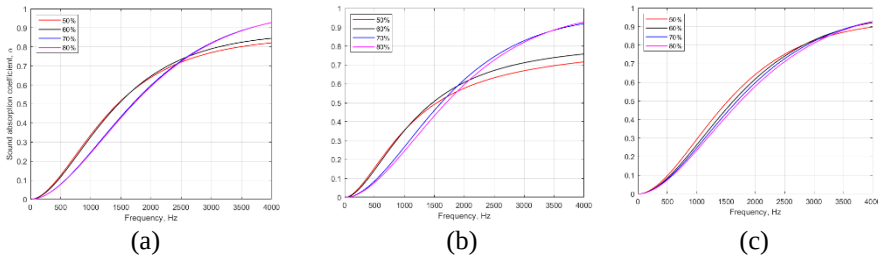


Fig S3.9. Prediction of PS and clay panels sound absorption: (a) 1–2.5 mm; (b) 2–5 mm; (c) 5–10 mm

Fig. S3.9 shows the results of the theoretical prediction of clay and PS composite panels. In the frequency range from 1 to 1600 Hz, a higher binder content (50–60% PS) results in a higher sound absorption (α up to 0.65) compared to composites with a lower binder (70–80% PS) (α up to 0.4). With less binder (70–80% PS), the sound absorption is higher at higher frequencies (1600–4000 Hz), the sound absorption coefficient is up to 0.93.

Fig. S3.10 shows the prediction results of sound absorption for cement and PS composite panels. It was found that theoretically determined sound absorption values of panels with a cement binder varied less with changing the binder amount. With a PS grain size of 2.5–5 and 5–10 mm, a change in sound absorption amounted only up to 0.06 (at 4000 Hz). Smaller particles result in a larger sound absorption difference (difference up to 0.1) due to the relatively small change in air resistance as the amount of binder changes.

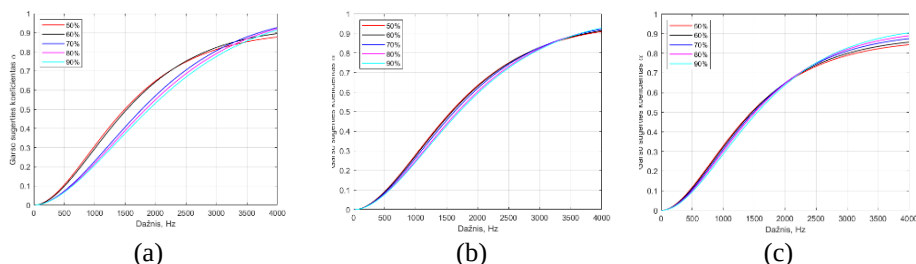


Fig S3.10. Prediction of PS and cement composite panels' sound absorption: (a) 1–2.5 mm; (b) 2–5 mm; (c) 5–10 mm

The adjustable sound absorber with PS panels was designed in light of these previously presented studies. This sound absorber was classified as a membrane type. The adjustable porous sound absorber is based on the resonance of the sound absorption of the porous material and its ability to vibrate when pressured with a sound wave (Fig. S3.11). When the sound wave (1) falls into the structure, a part of the energy is reflected, and some of it is absorbed into the composite plate (3) of the paper sludge, which is embedded in the absorber housing (2). The remaining sound energy passes through it, the diffracted wave is suppressed in the air gap (5) due to the acceleration of air particles within the air gap and reflected from the building structures (4), and after losing some of the sound energy, it returns to the room.

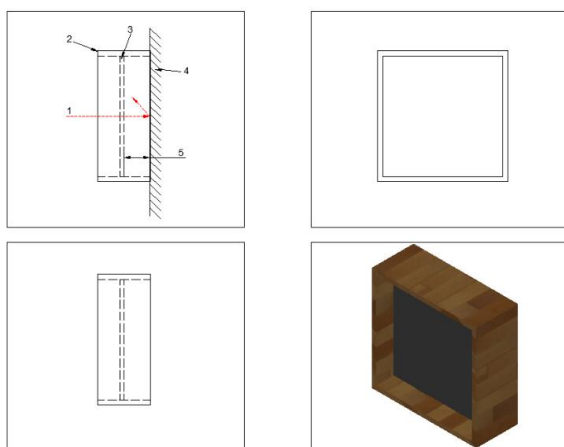


Fig. S3.11. Adjustable porous sound absorber

Since the sound absorption of sound-absorbing systems is most effective at $\frac{1}{4}$ wavelength, the air gap (5) behind the composite papermaking sludge plate (4) is adjustable so that the absorber could be adjusted to operate in the desired frequency range. A wide frequency range of sound absorption can be obtained by using several or a dozen such absorbers and setting different air gaps (5) behind the porous PS panel (3).

General conclusions

1. Four research methodologies were developed during this study. The impedance tube (frequency range 250–1600 Hz) and static airflow resistivity measurement laboratory equipment was designed and built. The results obtained on the static air flow resistivity test rig were used for the theoretical study. The obtained sound absorption data gained using impedance tube were compared with the theoretical study, and the results were used to design composite panels and sound absorber.

2. The static air flow resistivity studies of paper sludge composite panels have shown that the static air flow resistivity is inversely proportional to the amount of paper sludge in the material. As the amount of paper sludge in the material increases, the static air flow resistivity decreases exponentially. On average, the exponential function's decay factor at 1–2.5 mm grain size was 0.22; for 2.5–5 mm grains – 0.20; for 5–10 mm grain size – 0.16.

3. Slaked lime, clay and cement binding materials were used for the PS composite panels. These binders were chosen because they are considered traditional, their binding properties are well known. The average sound absorption efficiency of PS–slaked lime composites was 28%, PS–clay – 41%, PS–cement – 46%.

4. Based on the data of theoretical and experimental research on the dissertation topic, the passive sound absorber “Adjustable porous sound absorber” was developed. This device is distinguished by its versatility and the ability to adjust the effective sound absorption in the frequency spectrum. Sound absorber with a PS panel, consisting of 70% PS with clay and an air gap of 5 cm, and the sound absorption efficiency in the 500 Hz octave frequency band, is up to 95%. In the frequency range of 250–1600 Hz, the average sound absorption efficiency is up to 55%.

5. The reverberation time of a real room was predicted using numerical modelling software. Absorbers with different air gaps were used in the model. The combination of the absorbers with a different air gap results in a reduction of reverberation time over a wider range of octave frequency bands. If the sound of a certain octave frequency band needs to be reduced, absorbers must be used in an air gap specially selected for that octave frequency band. The modelling of room acoustics found that covering 20% of the room's surface with absorbers having different air gaps can reduce the reverberation time by up to 48%.

Priedai³

A priedas. PGD kompozitų teorinio garso sugerties tyrimo verifikavimo rezultatai

B priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija

C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Tomas ASTRAUSKAS

KOMPOZITINIŲ PLOKŠČIŲ IŠ POPIERIAUS GAMYBOS DUMBLO AKUSTINIŲ
SAVYBIŲ TYRIMAI IR GARSO ABSORBERIO KŪRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
aplinkos inžinerija (T 004)

THE RESEARCH OF ACOUSTIC PROPERTIES OF COMPOSITE PANELS MADE
OF PAPER SLUDGE AND DEVELOPMENT OF SOUND ABSORBER

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Environmental Engineering (T 004)

Lietuvių kalbos redaktorė Dalia Markevičiūtė
Anglų kalbos redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2022 04 12. 11,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2022-005-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius