

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas VILNIŠKIS

KONSTRUKCIJŲ SU DEVULKANIZUOTOS
GUMOS GRANULĖMIS KŪRIMAS IR JŲ
AKUSTINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
APLINKOS INŽINERIJA (T 004)

Vilnius, 2024

Disertacija rengta 2018–2024 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Tomas JANUŠEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerija – T 004).

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

Pirmininkas

dr. Jurgita MALAIŠKIENĖ (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. Olga KIZINIEVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerija – T 004),

dr. Fabio SERPILLI (Markės politechnikos universitetas, Italija, Statybos inžinerija – T 002),

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

Disertacija bus ginama viešame Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2024 m. birželio 7 d. 9 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto SRA - I posėdžių salėje.

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

Tel. +370 5 2744956, faksas +370 5 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2024 m. gegužės 6 d.

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

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2024-026-M mokslo literatūros knyga

<https://doi.org/10.20334/2024-026-M>

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2024

© Tomas Vilniškis, 2024

tomas.vilniskis@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tomas VILNIŠKIS

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF
ACOUSTIC PROPERTIES OF
CONSTRUCTIONS WITH DEVULCANIZED
RUBBER GRANULES

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENVIRONMENTAL ENGINEERING (T 004)

Vilnius, 2024

The doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2018–2024.

Supervisor

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

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

Chairperson:

Dr Jurgita MALAIŠKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Environmental Engineering – T 004).

Members:

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

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

Dr Fabio SERPILLI (Marche Polytechnic University, Italy, Civil Engineering – T 002),

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

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of the Scientific Field of Environmental Engineering at the SRA - I Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **9 a.m. on 7 June 2024.**

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

Tel.: +370 5 2744956, fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intended defence of the dissertation was sent on 6 May 2024.

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

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos kelių sluoksnių konstrukcijos, į kurių sandarą įeina devulkanizuotos gumos granulės. Pagrindinis tyrimo objektas – perdirbtų padangų gumos granulių plokštės ir jas naudojant sukurtos garsą izoliuojančios konstrukcijos. Disertacijos tikslas – sukurti efektyvią konstrukciją įrenginių triukšmui mažinti naudojant devulkanizuotas padangų gumos granulių plokštes. Darbe sprendžiami keli uždaviniai: pirmasis ir antrasis susiję su gumos granulių plokščių kūrimu ir jų fizinių bei akustinių savybių tyrimais; trečiasis susijęs su eksperimentiniais konstrukcijų, kurioms kurti naudojamos gumos granulių plokštės, tyrimais; ketvirtasis – su konstrukcijų teoriniu tyrimu taikant perdavimo matricos metodą; penktuoju numatyta suprojektuoti ir įvertinti garsą izoliuojančio gaubto triukšmo mažinimo efektyvumą.

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

Įvadiniamе skyriuje aprašoma tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimo objektas, išskiriami darbo uždaviniai, suformuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, nurodomos tyrimų metodikos, darbo mokslinis naujumas ir darbo rezultatų praktinė reikšmė, pateikiami ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pateikiamos disertacijos tema publikuotos autoriaus publikacijos ir pristatyti pranešimai konferencijose.

Pirmajame skyriuje nagrinėjamos gumos granulių naudojimo galimybės, aprašomi gumos granulių devulkanizavimo metodai, atliekama viengubų ir dvigubų konstrukcijų eksperimentinių teorinių tyrimų analizė. Antrajame skyriuje pateikiamos mėginių paruošimo, eksperimentinių įneštinio silpninimo, garso sugerties ir garso perdavimo sumažėjimo tyrimų, teorinio perdavimo matricos metodo ir skaitinio garso sumažėjimo modeliavimo metodikos. Trečiajame skyriuje pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė, skirta gumos granulių plokščių ir konstrukcijų su gumos granulėmis garso mažinimo efektyvumui įvertinti bei garsą izoliuojančiam gaubtui kurti.

Disertacijos tema paskelbti keturi moksliniai straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* sąrašą, vienas – konferencijų pranešimų rinkinyje. Gautas vienas Lietuvos respublikos patentas.

Disertacijos tema perskaityti keturi pranešimai konferencijose Lietuvoje ir kitose šalyse.

Abstract

The dissertation investigates multilayer constructions that use devulcanized rubber granules. The main object of the research is panels made of recycled rubber granules and sound-insulating structures created using them. The dissertation aims to create an efficient construction to reduce device noise, the construction of which uses devulcanized rubber granule panels. The work solves several tasks related to the creation of rubber granule panels and the research of their physical and acoustic properties, experimental studies of constructions with a rubber granule panel, the theoretical research of structures based on the transfer matrix method, and the intended design and evaluation of the noise reduction efficiency of the sound-insulating enclosure.

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

The introductory chapter describes the research problem, the relevance of the work, describes the research object, distinguishes the tasks of the work, formulates the purpose and tasks, indicates the research methodology, the scientific novelty, and the practical significance of the work results, and presents the defended statements. The introduction closes with lists of the author's publications and presentations on the topic of the dissertation.

The first chapter examines the possibilities of using rubber granules, describes methods of devulcanization of rubber granules, and carries out the analysis of experimental theoretical studies of multilayer constructions. The second chapter presents methods of sample preparation, experimental insertion loss, sound absorption and sound transmission loss studies, theoretical transmission matrix method, and numerical sound reduction modeling. The third chapter presents the results of experimental studies and their analysis for the evaluation of the sound reduction efficiency of rubber granule panels and constructions with rubber granules and the development of a sound-insulating enclosure.

Four scientific articles have been published on the dissertation topic: three in scientific journals included in the *Clarivate Analytics Web of Science* list and one in conference proceedings. One patent of the Republic of Lithuania was received.

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

Žymėjimai

Simboliai

B – lenkiamasis standumas (angl. *bending stiffness*), N/m^2 ;

c_0 – garso greitis ore (angl. *speed of sound in air*), m/s ;

f – dažnis (angl. *frequency*), Hz ;

f_c – kritinis dažnis (angl. *critical frequency*), Hz ;

f_p – rezonansinis dažnis (angl. *resonant frequency*), Hz ;

H_I – krintančiosios bangos perdavimo funkcija (angl. *the transfer function of incident wave*);

H_R – atspindėtosios bangos perdavimo funkcija (angl. *the transfer function of reflected wave*);

IL – įneštinis silpninimas (angl. *insertion loss*), dB ;

J – garso energija (angl. *sound energy*), J ;

J_0 – referentinis garso energijos lygis (angl. *reference sound energy*), J (10^{-12} J);

k – bangos skaičius (angl. *wave number*), $k = \omega/c$;

K_R – skaitinė konstanta (angl. *numerical constant*), lygi 47,3 dB ;

L_{Aeq} – ekvivalentinis garso slėgio lygis (angl. *equivalent sound pressure level*), dB ;

L_p – garso slėgio lygis (angl. *sound pressure level*), dB ;

L_w – garso galios lygis (angl. *sound power level*), dB ;

r – atspindžio koeficientas (angl. *reflection coefficient*);
 t – garso perdavimo koeficientas (angl. *transmission coefficient*), dB;
 TL – garso perdavimas (angl. *transmission loss*), dB;
 Z – akustinė varža (angl. *acoustic impedance*) $Z = \rho c$;
 α – garso sugerties koeficientas (angl. *sound absorption coefficient*);
 ρ_0 – oro tankis (angl. *density of air*), kg/m³;
 ω_c – kampinis dažnis (angl. *radial frequency*) $2\pi f$, rad/s.

Santrumpos

GKB – gipso kartono plokštė, naudojama sausosios statybos sistemoms (angl. *plasterboard used for dry construction systems*).

GKFI – sausosios statybos gipso kartono plokštė, naudojama sistemose, kurioms keliama gaisrinės saugos, garso izoliacijos ir fizinio stiprumo reikalavimai (angl. *plasterboard used for dry construction systems, which require fire safety, sound insulation and physical strength*).

TMM – garso perdavimo matricos metodas (angl. *transfer matrix method*).

Apibrėžtys

Akustinė varža (angl. *acoustic impedance*) – fizikinis parametras, įvertinantis medžiagos gebėjimą priešintis garso bangų sukeliama slėgiui

Baltasis triukšmas (angl. *white noise*) – garso įrenginio generuojamas triukšmo lygis, kurio dažninė charakteristika visame dažnių spektre (50–8000 Hz) yra vienoda.

Bangos skaičius (angl. *wave number*) – bangos ciklų skaičius per atstumo vienetą, m⁻¹.

Chemiškai devulkanizuotos gumos granulės (angl. *chemically devulcanized rubber granules*) – cheminės devulkanizacijos proceso metu gautos gumos granulės, kurių dydis siekia 0,6–4,0 mm.

Dviguba konstrukcija (angl. *double construction*) – konstrukcija, kurią sudaro dvi standžios plokštės, tarpusavyje atskirtos oro tarpu.

Dažnis (angl. *frequency*) – fizikinis dydis, rodantis, kiek kartų įvykis pasikartoja per laiko vienetą.

Devulkanizacija (angl. *devulcanization*) – procesas, kurio metu vulkanizuota guma skaidant S–S ir C–S jungtis yra perdirbama iki pradinės gumos stadijos, kai ji gali būti vėl iš naujo vulkanizuojama

Dinaminis standumas (angl. *dynamic stiffness*) – jėgos ir poslinkio kitimo santykis vibruojančioje sistemoje.

Garso izoliuojanti konstrukcija (angl. *sound insulating construction*) – konstrukcija, sudaryta iš dviejų gipso kartono plokščių, tarp kurių įterpta gumos granulių plokštė, skirta tiesioginių garso bangų perdavimui iš šaltinio į aplinką mažinti.

Garso galia (angl. *sound power*) – garso energija, kurią skleidžia triukšmo šaltinis, matuojama vatais, W.

Garso galios lygis (angl. *sound power level*) – garso galios ir atskaitinio garso galios (10^{-12} W) lygio santykio logaritmas, matuojamas decibelais, dB

Garso perdavimo sumažėjimas (angl. *transmission loss*) – kiekybinis rodiklis, nusakantis garso, perėjusio per medžiagą, energijos nuostolius.

Garso slėgio lygis (angl. *sound pressure level*) – garso slėgio ir atskaitinio garso slėgio (20 μ Pa) lygio santykio logaritmas, matuojamas decibelais, dB.

Garso slėgis (angl. *sound pressure*) – oro slėgio pasikeitimas garso bangai pereinant per terpę, Pa.

Garso sugertis (angl. *sound absorption*) – medžiagos geba paversti mechaninę garso energiją šilumine.

Gumos granulių plokštė (angl. *rubber granule panel*) – tam tikro storio plokštė, naudojama tyrimams, sudaryta iš gumos granulių, surištų poliuretaniniais klijais.

Įneštinis silpninimas (angl. *insertion loss*) – parametras, nusakantis, kiek sumažėja garso slėgio lygis, kai garso kelyje tarp triukšmo šaltinio ir triukšmo priimtuvo yra garsą izoliuojanti konstrukcija.

Okta (angl. *octave*) – intervalas tarp dviejų garsų, kurių dažniai skiriasi du kartus.

Orinė varža (angl. *flow resistivity*) – fizikinis parametras, būdingas porėtosioms medžiagoms, kuris įvertina medžiagos gebėjimą priešintis oro judėjimui medžiagos viduje.

Smulkioji gumos granulių frakcija (angl. *small fraction*) – mechaniškai smulkinant gautos gumos granulės, kurių dydis siekia 0,6–2,0 mm.

Stambioji gumos granulių frakcija (angl. *large fraction*) – mechaniškai smulkinant gautos gumos granulės, kurių dydis siekia 2,0–5,0 mm.

Triukšmo šaltinis (angl. *sound source*) – įtaisas, generuojantis garso galios lygį.

Vienguba akustinė konstrukcija (angl. *single construction*) – konstrukcija, kurią sudaro viena ar kelios standžios plokštės, tarp kurių nėra oro tarpo.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
 1. GUMOS GRANULIŲ NAUDOJIMO TRIUKŠMUI MAŽINTI IR GARSO SKLAIDOS MOKSLINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ	7
1.1. Konstrukcijų su gumos atliekomis naudojimo galimybių analizė	7
1.2. Gumos devulkanizacijos metodai	13
1.2.1. Pirminis apdorojimas	14
1.2.2. Smulkinimas nekeičiant gumos terminių savybių	15
1.2.3. Kriogeninis smulkinimas	15
1.2.4. Šlapiasis smulkinimas	15
1.2.5. Cheminė devulkanizacija.....	16
1.2.6. Ultragarsinė devulkanizacija	17

1.2.7. Mikrobangų devulkanizacijos metodas	17
1.2.8. Biologinis metodas	18
1.2.9. Termomechaninis metodas	18
1.2.10. Devulkanizacija superkritiniame CO ₂	19
1.3. Kelių sluoksnių konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo tyrimai	19
1.4. Viengubų ir dvigubų garsą izoliuojančių konstrukcijų teoriniai tyrimai	28
1.5. Garso izoliavimo modeliavimo programų apžvalga	37
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	40
 2. KONSTRUKCIJŲ SU GUMOS GRANULIŲ PLOKŠTĖMIS FIZIKINIŲ IR AKUSTINIŲ SAVYBIŲ EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ IR GARSĄ IZOLIUOJANČIO GAUBTO SKAITINIO MODELIAVIMO METODIKOS	43
2.1. Gumos granulių plokščių paruošimo metodika ir jų fizinių savybių tyrimai	44
2.1.1. Gumos granulių plokščių dinaminio standumo nustatymas	48
2.1.2. Gumos granulių plokščių statinės orinės varžos nustatymas	49
2.2. Medžiagų eksperimentinių tyrimų interferometru metodika	50
2.2.1. Garso sugerties tyrimo metodika	50
2.2.2. Garso perdavimo sumažėjimo tyrimo metodika	52
2.3. Eksperimentinio garso įneštinio silpninimo tyrimo metodika	55
2.4. Konstrukcijų garso izoliacijos rodiklių teorinių tyrimų metodika	57
2.5. Konstrukcijų garso izoliacijos skaitinio modeliavimo metodika	59
2.6. Garsą izoliuojančio gaubto skaitinio modeliavimo metodika	63
2.7. Antrojo skyriaus išvados	69
 3. EKSPERIMENTINIŲ, SKAITINIO IR TEORINIO MODELIAVIMO TYRIMŲ REZULTATAI	71
3.1. Gumos granulių plokščių fizinių savybių tyrimai	71
3.2. Medžiagų eksperimentiniai tyrimai interferometru	74
3.2.1. Garso sugerties tyrimai	74
3.2.2. Garso perdavimo sumažėjimo tyrimai	84
3.2.3. Rezultatų apibendrinimas ir diskusija	97
3.3. Eksperimentiniai garso įneštinio silpninimo tyrimai	98
3.4. Konstrukcijų su gumos granulių plokštėmis akustinių savybių teoriniai tyrimai	109
3.5. Garsą izoliuojančio gaubto su gumos granulių plokštėmis skaitinio modeliavimo rezultatai, jų analizė	114
3.6. Garsą izoliuojantis gaubtas	133
3.7. Trečiojo skyriaus išvados	136
 BENDROSIOS IŠVADOS	139
 REKOMENDACIJOS	141
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	143

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	153
SUMMARY IN ENGLISH.....	155

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the dissertation.....	2
The object of the research	3
The aim of the dissertation	3
The tasks of the dissertation	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the dissertation	4
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	5
1. ANALYSIS OF RESEARCH ON THE USE OF RUBBER GRANULES FOR NOISE REDUCTION AND SOUND PROPAGATION	7
1.1. Analysis of the possibilities of using constructions with rubber waste	7
1.2. Rubber devulcanization methods.....	13
1.2.1. Pre-process treatment	14
1.2.2. Ambient grinding	15
1.2.3. Cryogenic grinding process	15
1.2.4. Wet grinding process.....	15
1.2.5. Chemical devulcanization	16
1.2.6. Ultrasonic devulcanization	17

1.2.7. Microwave method	17
1.2.8. Biological method	18
1.2.9. Thermomechanical method	18
1.2.10. Devulcanization in supercritical CO ₂	19
1.3. Research on sound transmission reduction in multilayer constructions	19
1.4 Theoretical studies of single and double sound insulating constructions	28
1.5. Review of sound insulation simulation programs	37
1.6. Conclusions of the First Chapter and formulation of dissertation tasks	40
 2. METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDIES OF PHYSICAL AND ACOUSTIC PROPERTIES OF CONSTRUCTIONS WITH RUBBER GRANULE PANELS AND NUMERICAL MODELING OF A SOUND-INSULATING ENCLOSURE	 43
2.1. Methodology for the preparation of rubber granule panels and studies of their physical properties	44
2.1.1. Determination of dynamic stiffness of rubber granule panels	48
2.1.2. Determination of static flow resistivity of rubber granulate panels.....	49
2.2. Methodology of materials experimental research with an impedance tube.....	50
2.2.1. Method to determine sound absorption	50
2.2.2. Method to determine sound transmission loss.....	52
2.3. Methodology of experimental study of sound insertion loss	55
2.4. Methodology of theoretical studies of sound insulation of constructions	57
2.5. Numerical modeling methodology of sound insulation of constructions	59
2.6. Numerical modeling methodology of a sound insulating enclosure.....	63
2.7. Conclusions of the Second Chapter.....	69
 3. RESULTS OF EXPERIMENTAL, NUMERICAL AND THEORETICAL MODELING STUDIES	 71
3.1. Investigations of the physical properties of rubber granular panels	71
3.2. Experimental studies of materials using an impedance tube	74
3.2.1. Experimental studies of sound absorption.....	74
3.2.2. Experimental studies of sound transmission loss.	84
3.2.3. Summary of results and discussion	97
3.3. Experimental studies of sound insertion loss	98
3.4. Theoretical studies of acoustic properties of constructions with rubber granule panels	109
3.5. Numerical simulation results and their analysis of sound-insulating enclosure with rubber granule panels.	114
3.6. Sound insulating enclosure.....	133
3.7. Conclusions of the Third Chapter.....	136
 GENERAL CONCLUSIONS	 139
 RECOMMENDATION	 141

REFERENCES	143
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	153
SUMMARY IN ENGLISH.....	155

Išvadas

Problemos formulavimas

Vystantis automobilių pramonei, pagaminamų padangų kasmet vis daugėja, tačiau pagrindinė problema – kaip panaudotas padangas tinkamai utilizuoti. Šiuo metu daug dėmesio skiriama padangų gumos devulkanizacijai, siekiant gumos atliekas grąžinti į pirminę būseną, kai iš jų gali būti gaminami nauji gumos gaminiai. Devulkanizacijos procesui ypač svarbu gauti gumos granules, kurios yra be papildomų tekstilės, metalo ir kitų priemaišų. Tokios gumos granulės gali būti naudojamos ne tik naujų gumos gaminių gamybai – iš jų gali būti kuriami ir kiti gaminiai.

Vienas iš naujų gumos atliekų naudojimo būdų – gumos granulių plokščių gamyba. Šios plokštės gali būti pritaikomos vaikų žaidimų aikštelėms įrengti, įrenginių sukeliamoms vibracijoms slopinti ar garsą izoliuojančioms arba sugėriamoms plokštėms kurti.

Darbe sprendžiama garso izoliacijos problematika naudojant gumos granulių plokštes, kuriant kelių sluoksnių konstrukcijas, kai gumos granulės papildomai derinamos su gipso kartono plokštėmis.

Atsižvelgiant į gumos granulių plokščių akustines savybes, kuriamos lengvos, plonos konstrukcijos, kurios gali būti skirtos įrenginių sklaidžiamam triukšmui mažinti. Įrenginių triukšmo sklaida aplinkoje yra didelė problema.

Įvairūs veikiantys įrenginiai pastatuose ir jų išorėje, dyzeliniai generatoriai mugėse ar atvirose prekybos vietose sukelia aukštą triukšmo lygį, kuris dažnai viršija esamą foninį triukšmo lygį, todėl ypač svarbu rasti būdus, kaip pritaikyti atitinkamus sprendimus triukšmui mažinti.

Darbo aktualumas

Vystantis pramonei, diegiant įvairius sprendimus žmonių gyvenimo komfortui užtikrinti, patalpų viduje ir išorėje sumontuojami garsą skleidžiantys įrenginiai. Įvairūs pramonės įrenginiai, vėdinimo kameros, oro aušyklės, elektros generatoriai mūsų aplinkoje generuoja nepageidaujamą triukšmą, kuris dažnu atveju viršija esamą foninį triukšmo lygį. Todėl šiais laikais aktualu rasti garso izoliacijos sprendimus, kurių konstrukcijoje būtų panaudotos lengvos, plonos konstrukcijos, o jų garso izoliacijos efektyvumas būtų kuo didesnis. Tokioms konstrukcijoms kurti gali būti naudojamos ir medžiagos, pagamintos iš perdirbtų atliekų. Vienas iš sprendimų – naudotų padangų perdirbimas ir gumos plokščių gamyba, kurias derinant su kitomis medžiagomis gaunamos plonos garsą izoliuojančios konstrukcijos.

Padangų atliekos yra sunkiai perdirbamos, tam reikia milžiniškų resursų, o taikomi perdirbimo metodai didina aplinkos užterštumą. Todėl pakartotinis jų naudojimas, laikantis žiedinės ekonomikos principų, yra ypač aktualus. Tačiau, norint šias medžiagas panaudoti garso izoliacijai ir absorbcijai, reikia nustatyti, kaip jas paversti praktikoje tinkamais naudoti gaminiais. Dalis mokslininkų tiria, kaip panaudoti atliekas betono konstrukcijose, pakeičiant gamtos išteklius atliekomis (Batayneh et al., 2007; Karakurt, 2015; Khaloo et al., 2008; Nacif et al., 2013; Zhu et al., 2018). Yra atlikta nemažai darbų tyrinėjant, kaip atliekos keičia konstrukcijų garso izoliacines ir absorbcines savybes, bei nagrinėjant gumos atliekų įtaką konstrukcijų akustinėms savybėms (Corredor-Bedoya et al., 2017; Herrero et al., 2013; Mohammed et al., 2012; Zhang & Poon, 2018). Vis dėlto verta paminėti, kad daugelis darbų koncentruoti į padangų atliekų naudojimą betono konstrukcijose, o konstrukcijų kūrimas, naudojant tik padangų gumą, jungiant jų komponentus į plokštes ir nagrinėjant konstrukcijų fizines, chemines ir akustines savybes, nėra nuodugniai ištirtas, todėl šioje srityje aktualu atlikti mokslinius tyrimus.

Šiame darbe analizuojama, kaip sukurti gumos granulių plokštes, jas surišant dervomis ir kietikliu. Gumos granulių plokštes derinant su gipso kartono plokštėmis, gaunamos garsą izoliuojančios kelių sluoksnių konstrukcijos. Jos, atsižvelgiant į akustines savybes, gali būti naudojamos garsą izoliuojančioms konstrukcijoms kurti, padedančioms mažinti įrenginių skleidžiamą triukšmą.

Tyrimų objektas

Disertacijos tyrimų objektas – perdirbtų padangų gumos granulių plokštės ir iš jų sukurtos garsą sugeriančios ir izoliuojančios konstrukcijos.

Darbo tikslas

Atsižvelgiant į teorinių, skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatus, sukurti garsą sugeriančią ir izoliuojančią gumos granulių plokštę ir garsą izoliuojantį gaubtą, skirtą įrenginių triukšmui mažinti.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Keičiant gumos granulių frakcijų ir devulkanizuotos gumos santykį, naudojant poliuretaninius kljus, sukurti gumos granulių plokštes bei atlikti jų fizinių ir garso sugerties savybių eksperimentinius tyrimus.
2. Naudojant gumos granulių plokštes sukurti garsą izoliuojančias konstrukcijas ir atlikti jų įneštinio silpninimo bei garso perdavimo sumažėjimo tyrimus.
3. Atlikti konstrukcijų, priklausomai nuo gumos granulių plokščių storio, garso izoliacijos teorinį modeliavimą perdavimo matricos metodu.
4. Remiantis eksperimentinių ir teorinių tyrimų duomenimis, sukurti garsą izoliuojantį gaubtą ir modeliavimo būdu įvertinti jo efektyvumą mažinant įrenginių triukšmą.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi medžiagų garso sugerties koeficiento (α) ir garso perdavimo sumažėjimo (TL) eksperimentiniai laboratoriniai metodai naudojant interferometrą. Metodai paremti atitinkamais standartais ISO 10534-2:2023 ir ASTM E2611-17:2019. Didesnio skersmens mėginių (300×300 mm) įneštinio silpninimo tyrimai atliekami beaidėje kameroje specialiai sukonstruotame stende. Teoriniai tyrimai atlikti perdavimo matricos metodu, vertinant pagal gumos granulių mėginio akustinę varžą (Z_l) ir bangos skaičių ($k_{0,z}$).

Siekiant prognozuoti eksperimentinių tyrimų rezultatus, taikomas teorinis perdavimo matricos metodas ir skaitinis konstrukcijų modeliavimas INSUL programa. Garsą izoliuojančio gaubto garso izoliacijos efektyvumas modeliuojamas „Odeon“ programine įranga.

Darbo mokslinis naujumas

Naudojant skirtingos frakcijos ir chemiškai devulkanizuotas gumos granules, jas surišant poliuretaniniais klijais, sukurtos garsą izoliuojančios arba absorbuojančios gumos granulių plokštės. Charakterizuota plokščių orinė varža, dinaminis standumas, tankis, garso perdavimo sumažėjimas ir garso sugertis. Remiantis teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais sukurta garsą izoliuojanti konstrukcija, skirta įrenginių triukšmui mažinti.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Gumos granulių, pagamintų iš panaudotų padangų, pritaikymas garsą izoliuojančiose konstrukcijose gali prisidėti prie padangų atliekų mažinimo. Gumos granulių plokštės, lyginant su kitomis dažnai naudojamomis medžiagomis (mineraline vata, porolonu), yra tvirtesnės, tačiau pasižymi panašiomis akustinėmis savybėmis. Gumos plokštės dėl savo dinaminių savybių, vibracijos slopinimo yra tinkamos kelių sluoksnių konstrukcijoms kurti, kai gumos granulių plokštės derinamos su gipso kartono ar alternatyviomis plokštėmis. Tai leidžia sukurti ploną garsą izoliuojančią konstrukciją, kuri gali būti panaudota garsą izoliuojančioms konstrukcijoms kurti.

Kelių sluoksnių konstrukcijos gali būti panaudotos kuriant specialius garsą izoliuojančius gaubtus, siekiant mažinti įrenginių skleidžiamą triukšmo lygį. Siekiant užtikrinti tinkamą įrenginio ventiliaciją, papildomai naudojamos patentuotos (patento Nr. LT 6593) žaliuzių konstrukcijos, kuriose guma naudojama kaip garsą sugerianti medžiaga.

Ginamieji teiginiai

1. Į gumos granulių plokštės sudėtį įtraukus $>50\%$ chemiškai devulkanizuotų gumos granulių, pasiekiamos optimalios orinės varžos vertės ($80\text{--}95\text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2$), užtikrinančios aukščiausias garso sugerties vertes.

2. 15 mm gumos granulių plokštėje didinant smulkiosios frakcijos gumos granulių kiekį 25 %, jos tankis didėja iki 2,5 %, o garso perdavimo sumažėjimo vertės didėja iki 1,0 dB.
3. 50 mm gumos granulių plokštėje mažinant smulkiosios frakcijos gumos granulių kiekį 25 %, jos dinaminis standumas sumažėja iki 5,3 %, o garso perdavimo sumažėjimo vertės padidėja iki 0,8 dB.
4. Garsą izoliuojantis gaubtas, kurio konstrukcijoje panaudotos 50 mm gumos granulių plokštės, pakreiptos 45° kampu, garso slėgio lygį sumažina iki 10 dB.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdinti penki moksliniai straipsniai. Keturi mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* (Vilniškis & Januševičius, 2023a, 2024a, 2024b; Vilniškis et al., 2020), vienas – konferencijų pranešimų leidinyje, referuojamame kitose duomenų bazėse (Vilniškis & Januševičius, 2023b). Gautas Lietuvos Respublikos patentas „Triukšmą mažinančios ir orą praleidžiančios žaliuzės, padengtos gumos granulatu“, patento Nr. LT 6593 (Vilniškis ir Januševičius, 2019).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti keturiuose konferencijose:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis. Aplinkos apsaugos inžinerija“, 2021 m. Vilniuje, Lietuvoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „Deutsche Kautschuk-Tagung and International Rubber Conference DKT IRC 2021“, 2022 m., Niurnberge, Vokietijoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „Conference of Environmental and Climate technologies“, 2023 m. Rygoje, Latvijoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „Environmental Engineering“ 2023 m., Vilniuje.

Disertacija buvo pristatyta 2024 m. vasario 19 d. Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto seminaro metu.

Disertacijos struktūra

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

Darbo apimtis – 169 puslapiai, tekste pateiktos 77 numeruotos formulės, 96 paveikslai ir 9 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 109 literatūros šaltiniai.

Gumos granulių naudojimo triukšmui mažinti ir garso sklaidos mokslinių tyrimų apžvalga

Skyriuje analizuojamos gumos atliekų naudojimo galimybės triukšmo sklaidai mažinti skirtose konstrukcijose. Apžvelgiamos pasaulyje jau sukurtos ir išbandytos iš atliekų pagamintos konstrukcijos, gumos perdirbimo metodai, analizuojamos triukšmo sklaidos charakteristikos, įvertinami teoriniai ir skaitiniai modeliai.

Skyriaus tematika išspausdinti penki moksliniai straipsniai (Vilniškis & Januševičius, 2023a, 2023b, 2024a, 2024b; Vilniškis et al., 2020)

1.1. Konstrukcijų su gumos atliekomis naudojimo galimybių analizė

Pasauliniu mastu kiekvienais metais dėl vis didėjančio automobilių skaičiaus pagaminama maždaug 1,5 milijardo naujų padangų, tad padangų atliekos tapo viena didžiausių aplinkosaugos problemų (Shen et al., 2013). Yra apskaičiuota, kad kiekvienais metais apie 1 milijardo padangų naudojimo laikas baigiasi, o

daugiau kaip 50 % šio kiekio vežama į sąvartynus. Iki 2030 m. panaudotų padangų skaičius gali pasiekti 1,2 milijardo, o įskaitant sandėliuojamas – 5 milijardus (Azevedo et al., 2012; Shu & Huang, 2014). Europos padangų ir gumos gamintojų asociacijos (ETRMA) duomenimis, kuri surenka informaciją iš 32 Europos šalių, 95 % panaudotų padangų yra perdirbamos arba panaudojamos energijos gamybai ir tik 5 % panaudotų padangų nėra identifikuota (Formela, 2022). 2019 m. duomenimis, buvo perdirbta 3,55 milijono tonų (Mt) padangų, kurios buvo perdirbtos šiais būdais:

1. 54 % padangų atliekų buvo panaudotos pakartotinai:
 - 1,36 Mt padangų buvo sumulkintos ir iš jų pagamintos granulės, 476 t buvo įdėtos į betono gaminius;
 - 0,11 Mt padangų buvo panaudota civilinėje inžinerijoje;
 - 0,26 Mt padangų buvo restauruotos.
2. 40 % padangų buvo panaudota energijos gamybai:
 - 1,15 Mt padangų buvo panaudota cemento gamyboje, padangas naudojant kaip kurą;
 - 0,1 Mt padangų naudojama elektrinėse ir bendram deginimui su kitomis atliekomis.
3. 5 % padangų panaudota kitiems procesams, įskaitant padangų kaupimą.

Tokios padangos gali būti naudojamos įvairiais būdais, šalinamos specialiose surinkimo aikštelėse, deginamos kaip kuras šilumai išgauti, deginamos pirolizės būdu (Wang & Ma, 2017), naudojamos kuriant naujas medžiagas ir kt. Padangas kaupti specialiose aikštelėse yra lengviausia, tačiau ilgainiui tai paveikia ekosistemas, teršiama aplinka, kyla gaisro pavojus. Padangų deginimas yra vienas paprasčiausių sprendimo būdų, tačiau ir pats žalingiausias, nes deginant išsiskiria dideli kiekiai nuodingųjų teršalų, padidėja dujų emisijos, kurios yra ypač pavojingos žmonėms, gyvūnams ir augalams. Panaudotų padangų atliekų kaloringumas yra 32 MJ/kg – panašaus kaloringumo kaip gamtinių dujų (33,9 MJ/kg), o tai padangas daro konkurencingas, lyginant su kitomis kuro rūšimis, ypač su anglimis, kurių kalorinė vertė yra kur kas mažesnė (25,1 MJ/kg) (Gieré et al., 2006). Dėl šios priežasties cemento gamintojai yra vienas didžiausių padangų perdirbėjų, nes jas panaudoja kaip anglių alternatyvą. Šiuo metu cemento gamyklos kaip kurą geba naudoti vien padangas. Tai įmanoma, nes cemento gamyboje naudojama ypač aukšta temperatūra (1200 °C), dėl to visų padangų komponentai sudeginami (Pipilikaki et al., 2005). Padangos gaminamos iš organinių junginių – stireno ir butadieno. Todėl deginamos padangos atlaisvina stireno ir butadieno junginius. Butadienas yra kancerogeninis junginys, kuris gali būti išleistas iš stireno ir butadieno polimero degimo metu. Deginimo padangas išsiskiria tamsiai juodos spalvos dūmai, kurie prastina matomumą, taip pat juose yra begalė nuodingųjų dujų – poliaromatinių hidrokarbonatų, CO, SO₂, NO₂ ir HCl, o susidarę pelenai užteršia dirvožemį ir atmosferą (Thomas & Gupta, 2016).

Paskutinius keletą metų pramonė priima iššūkį siekdama pritaikyti žiedinės ekonomikos principus aplinkai draugiškoms medžiagoms rasti, taip pat panaudoti atliekas naujiems gaminiams kurti. Vienas iš padangų pakartotinio naudojimo būtų – įterpti jas į betoną ir pakeisti keletą gamtinių medžiagų, tokių kaip smėlis. Šis būdas nekenkia aplinkai, nes panaudotos atliekos jos nebeteršia, taip pat sumažinamos anglies dioksido emisijos. Toks būdas yra net ekonomiškai efektyvus, nes gamtinės žaliavos, naudojamos betono gamyboje, yra gana brangios, o pakeitus jas gumos atliekomis, bus sutaupoma didelė dalis gamtinių išteklių (Kovler & Roussel, 2011; Najim & Hall, 2012; Uygunoğlu & Topçu, 2010). Taip pat padangų atliekos gali būti perdirbamos atskiriant gumą nuo karkaso. Susmulkintos atliekos dėl savo dydžio, formos, didelio elastingumo, gero vibracijų ir triukšmo slopinimo naudojamos inžinerijoje. Gumos komponentų savybės tiesiogiai priklauso nuo jų mikrostruktūros, kuri suformuojama elastomerinių grandinių (kaučiuko, polimerų, dervų) ir užpildo, sudarančio nuolatinį ir homogeninį polimerinį kompozitą (Medina et al., 2018). Kaučiukas yra plačiausiai naudojamas elastomeras gumos gamyboje dėl savo atsparumo tempimo jėgoms ir elastingumo. Tai priklauso nuo kaučiuko molekulinės masės ir ilgų polimerinių grandžių (González et al., 2005). Norint toliau gerinti kaučiuko savybes, jis maišomas su sintetine guma. Šiuo metu įvairių markių sintetinė guma naudojama daugelyje sričių, o gaminama polimerizuojant monomerus. Paprastai polimerizuojamas stirenas bei butadienas ir gaunama stireno butadieno guma (SBR) bei polibutadieno guma (BR). Todėl dėl savo savybių gumos atliekos gali būti naudojamos naujoms statybinėms medžiagoms kurti, triukšmo barjerams palei kelius, geležinkelius statyti, taip pat upių krantinėms tvirtinti bei kitiems inžineriniams įrenginiams sukurti (Sienkiewicz et al., 2012).

Pasaulyje šiuo metu ypač skatinama taikyti žiedinės ekonomikos principą siekiant pakartotinai naudoti atliekas, įtraukiant jas į įvairius produktus. Todėl yra atliekama daug mokslinių tyrimų, susijusių su gumos atliekų naudojimu statybinėse konstrukcijose ir kuriant inovatyvius gaminius. Vienas populiariausių gumos atliekų naudojimo būdų – įdėti juos į betono mišinius. Ši sritis domina daugelį mokslininkų, kurie, naudodami skirtingo dydžio ir sandaros gumos granules betono mišiniuose, tiria jų mechanines, termoizoliacines, akustines ir kitas savybes. Pagrindinė praktinė gumos atliekų naudojimo betono mišiniuose priežastis – pakeisti užpildą. Kadangi betonas sudaromas iš rišamųjų medžiagų (cemento), užpildo (smėlio, žvyro) ir vandens, gamtinių žaliavų pakeitimas guma tiek ekonominiu, tiek aplinkosaugos požiūriu yra patraukli alternatyva. Tyrėjai išskiria tris plačias gumos kategorijas, tinkamas naudoti betono mišiniuose:

- Gumos nuorėžos „Chipped rubber“, kurių dydis yra 25–30 mm ir jos tinkamos didelės frakcijos žvyro dalelėms pakeisti.
- Gumos granulės „Crumb rubber“, kurių dydis yra 3–10 mm ir jos tinkamos smulkesnės frakcijos žvyro ir smėlio dalelėms pakeisti.

- Gumos miltai „Powdered rubber“, kurių dalelių dydis yra mažesnis nei 1 mm ir tinkamos smulkiosios frakcijos smėlio dalelėms pakeisti (Gerges et al., 2018).

Gumos atliekos taip pat patrauklios ir todėl, jog jos gali būti naudojamos kuriant lengvesnes konstrukcijas. Mineralinių medžiagų, tokių kaip smėlis ar žvyras, tankis yra 1600–2080 kg/m³, o gumos granulių – 640–720 kg/m³ (Gerges et al., 2018). Todėl tyrėjai, kurdami naujas konstrukcijas, kreipia daug dėmesio į jų tvirtumą, lankstumą, elastinges ir akustines savybes.

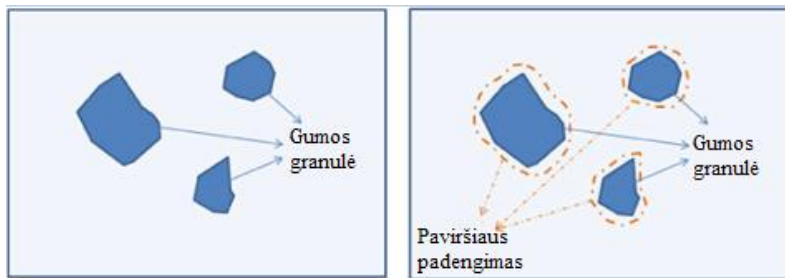
Yra nustatyta, jog, naudojant gumos granules betono mišiniuose, betono atsparumas gniuždymui mažėja. Zhu et al. (2018) bandė nustatyti, ar tolygus gumos dalelių pasiskirstymas betono mišinyje turi įtakos mišinio atsparumui gniuždymui. Jie teigė, jog gumos dalelių pasiskirstymas mišinyje tiesiogiai priklauso nuo betono susmukimo lygio ir vibracijos laiko. Mišinių susmukimo lygį mokslininkai koregavo keisdami vandens kiekį mišinyje. Savo tyrimu mokslininkai padarė išvadą, jog, padidinus mišiniuose vandens kiekį, taip pat ilgiau tankinant betono mišinį, galima tolygiau paskirstyti gumos granules betono mišinyje. O tai ypač svarbu tiriant konstrukcijų atsparumą gniuždymui. Rezultatai parodė, jog, tinkamai paskirsčius gumos granules mišinyje, galima kontroliuoti betono mišinio stiprumo savybes Tačiau daugeliu tyrimų įrodyta, jog betono mišinių atsparumas gniuždymui yra proporcingas gumos dalelių kiekiui mišinyje. Didinant gumos granulių koncentraciją, atsparumas gniuždymui mažėja, nes dėl savo savybių guma blogiau sulimpa su rišamąja medžiaga (Ganjan et al., 2009; Karakurt, 2015; Khaloo et al., 2008). Taip pat nustatyta, jog, mažinant gumos dalelių dydį betono mišiniuose, atsparumą gniuždymui galima padidinti (Nacif et al., 2013; Su et al., 2015).

Dėl tų pačių sąlygų panašūs rezultatai gaunami ir tiriant betono konstrukcijų atsparumą lenkimui ir tempimui. Mokslininkai nustatė, jog, lyginant su paprastais betono mišiniais, mišiniai su gumos granulėmis pasižymi šiek tiek prastesnėmis mechaninėmis savybėmis. Rezultatai rodo, kad, didinant gumos granulių kiekį, bandinių rezultatai prastėja. Tačiau didelę įtaką mišinių stiprumui daro gumos granulių dydis– nustatyta, kad, naudojant mažesnės frakcijos gumos daleles, galima išgauti geresnes mechanines savybes (Fantilli & Chiaia, 2018; Gerges et al., 2018; Mendis et al., 2018).

Vienas svarbus aspektas, kurį galima pagerinti naudojant gumos granules betono mišiniuose, tai akustinės savybės. Yra atlikta betono mišinių gebos absorbuoti garsą tyrimų. Atsižvelgiant į panaudotų gumos granulių kiekį, dalelių dydį, pasiskirstymo tolygumą mėginyje galima keisti betono mišinių akustines savybes. Guma yra tokia medžiaga, kuri vibruodama gali išskaidyti energiją. Energijos kiekis, kurį galima išsklaidyti, priklauso nuo dažnio ir gumos kiekio, kurį sudaro junginys. Geros gumos savybės išskaidyti dinaminę energiją leidžia išgauti ir geresnę oru sklindančio bei smūginio garso izoliaciją (Herrero et al.,

2013). Corredor-Bedoya savo darbe analizavo, kaip naudojant smulkiosios frakcijos (0,25–1 mm) gumos granules, keičiasi betono mišinio absorbcinės savybės. Mėginiuose gumos kiekis varijavo nuo 0 iki 25 %. Tyrimas buvo atliktas interferometru ir nustatyta, jog geriausios absorbcinės savybės pasiekiamos esant 25 % gumos granulių, kurių dydis varijavo nuo 0,25 iki 0,5 mm (Corredor-Bedoya et al., 2017). Kituose tyrimuose taip pat gauti panašūs rezultatai. Nustatyta, jog, naudojant gumos granules, galima pagerinti ne tik konstrukcijų absorbcines savybes, bet kartu ir izoliacines savybes (Mohammed et al., 2012). Norėdami paaiškinti lengvųjų, poringųjų betono mišinių absorbcijos kitimą, daugelis autorių sieja garso absorbciją su oro kiekiu, kuris susidaro aplink gumos granules, dėl to padidėja medžiagos poringumas (Gandoman et al., 2015). Kiti autoriai teigia, jog yra koreliacija tarp panaudotų gumos dalelių dydžio ir formos bei poringumo (Kim & Lee, 2010; Lian et al., 2011).

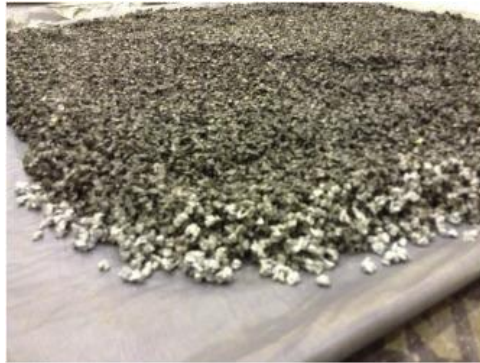
Gumos granulių naudojimas taip pat yra aktualus kuriant perdangų konstrukcijas. Jos gali būti naudojamos kuriant lengvasias perdangos plokštes, o gumos granulių elastinės ir akustinės savybės pagerina perdangų smūginio garso izoliacijos rezultatus. Mokslininkas (Zhang & Poon, 2018) tyrė tokių konstrukcijų garso izoliaciją. Tyrimui jie naudojo mažo tankio – 924 kg/m^3 – betoną ir perdirbtų padangų granules, kurių dydis varijavo nuo 1,18 mm iki 5 mm. Tyrimai buvo atlikti naudojant paprastą ir apdirbtą gumą.



1.1 pav. Neapdirbtų ir apdirbtų gumos granulių iliustracija (Zhang & Poon, 2018)

Fig. 1.1. Illustration of untreated rubber aggregate in cement matrix; and (b) pretreated rubber aggregate in cement matrix (Zhang & Poon, 2018)

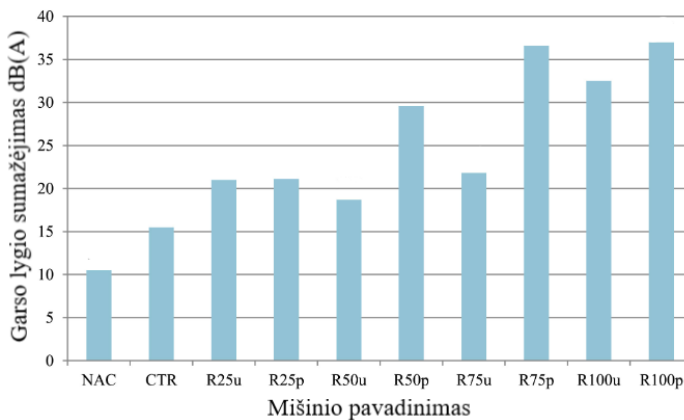
Apdirbant gumą gumos granulės buvo padengtos cemento pasta ir džiovintos ore 7 dienas. Apdirbtų gumų scheminis vaizdas pateiktas 1.1 pav., 1.2 pav. parodyta, kaip atrodė apdirbtos granulės.



1.2 pav. Apdirbtos gumos granulės (Zhang & Poon, 2018)

Fig. 1.2. Rubber aggregate after surface treatment (Zhang & Poon, 2018)

Taip apdirbtos gumos granulės jos labiau sukimba su betono mišinio, dėl ko pagerėja konstrukcijos stiprumas. Mokslininkai savo darbe skirtingomis betono mišinio ir apdirbtų bei neapdirbtų granulių proporcijomis sudarė 11 skirtingų mišinių. Garso izoliacijos rezultatai pateikti grafiškai (1.3 pav.).



1.3 pav. Skirtingo mišinio perdangos plokščių vidutinis garso lygio sumažėjimas (Zhang & Poon, 2018)

Fig. 1.3. Average sound level reduction of different mix overlay panels (Zhang & Poon, 2018)

Rezultatai parodė, jog, didinant gumos granulių skaičių, pasiekiamas geresnis konstrukcijos smūginio garso izoliacijos rezultatas. Iš grafiko matoma, jog, lyginant kontrolinių mėginių garso izoliaciją su mėginiais, kuriuose yra gumos

granulių, rezultatas gali būti iki trijų kartų didesnis. Autoriai teigia, jog, panaudojus gumos granules, dėl gumos granulių elastingumo pasikeičia dinaminis Jungo modulis, o tai pagerina akustines konstrukcijos savybes (Zhang & Poon, 2018). Mokslininkų prielaidas patvirtina ir kitų mokslininkų atlikti darbai, kurie apibrėžia koreliaciją tarp dinaminio Jungo modulio ir garso sumažėjimo (Benkreira et al., 2011; Branco & Godinho, 2013; Kim et al., 2009).

Analizuojant mokslininkų darbus, galima pastebėti, jog guma yra kaip alternatyva pakeisti gamtines žaliavas, o tai ypač svarbu taikant žiedinės ekonomikos principą pakeičiant žaliavas atliekomis. Gumos atliekų naudojimas betono konstrukcijose moksliniu požiūriu yra ypač nagrinėjama inovacija. Naudojamos gumos granulės gali keisti konstrukcijų tankį, lengvinti konstrukcijas, keisti jų elastines savybes, poringumą, nuo ko daugiausia priklauso ir konstrukcijų akustinės savybės. Todėl gumos granulių naudojimas betono mišiniuose leidžia keisti konstrukcijų orinio garso ir smūginio garso izoliacines savybes. Yra atlikta daugybė gumos atliekų naudojimo betono mišiniuose tyrimų, bet nėra atliktų tyrimų naudojant gumos plokštes, kuriomis galima būtų pakeisti mineralinę vatą ir polistireną lengvosiose konstrukcijose. Ši sritis neištyrinėta, todėl turi būti atlikti išsamūs tyrimai nustatant, kaip atitinkamas gumos sluoksnis statybinėse konstrukcijose gali pagerinti akustines, termoizoliacines ir kitas svarbias statybinių elementų charakteristikas.

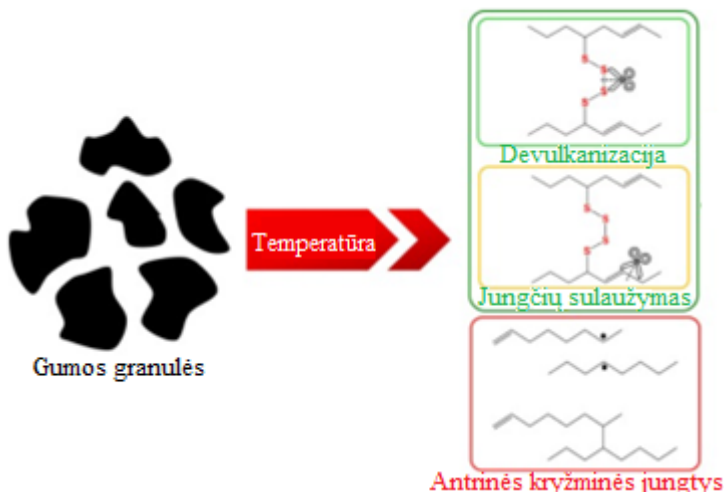
1.2. Gumos devulkanizacijos metodai

Perdirbant ar pakartotinai naudojant vulkanizuotą gumą ypač svarbu rasti tinkamus ir saugius būdus ją devulkanizuoti, kai poli-, di- ir monosulfidiniai ryšiai, susidarę vulkanizacijos metu, yra visiškai arba iš dalies nutraukiami. Devulkanizacija apibrėžia procesą, kai vulkanizuotos gumos atliekos transformuojamos, o papildomai apdirbtos gali būti iš naujo vulkanizuotos. Devulkanizuotos gumos naudojimas gali sumažinti produktų kainą.

Gumos atliekų devulkanizacijai reikalingas didelis energijos kiekis. Prieš devulkanizavimo procesą gumos atliekos turi būti susmulkintos, sumaltos ir atskirtos nuo kitų komponentų, kurie patenka į padangų struktūrą, ypač svarbu gumą atskirti nuo metalinio padangos karkaso (Winoto & Yoswathana, 2019). Technologinis smulkinimo procesas, nors ir paprastas kinematikos požiūriu, vis dėlto labai sudėtingas, nes smulkinimo metu pakyla gumos temperatūra ir netiesiogiai atsiranda jos atsparumas šlyčiai. Yra skaičiuojama, jog energijos kiekis, reikalingas 1 kg gumos atliekų susmulkinti iki 0,5 mm dydžio granulių, siekia 1 kWh (Wu et al., 2019). Vertinant visą devulkanizacijos procesą ir įskaičiuojant energijos kiekį, reikalingą S–S ir C–S jungtims sulaužyti, matyti, kad suvartojamos energijos kiekis gali siekti iki 2,5 kWh/kg (Dobrotā & Dobrotā,

2019). Nepaisant to, jog gumos devulkanizacijai reikalingas papildomas energijos kiekis, tačiau šis metodas yra tvaresnis, lyginant su padangų atliekų deginimu.

Naudojant devulkanizuotą gumą gali būti gaminami nauji produktai, taip pat ji gali būti maišoma su žaliavine guma ar kitais polimerais. Literatūroje išskiriami skirtingi gumos devulkanizavimo metodai, aprašomi šiame skyriuje (Asaro et al. 2018). Devulkanizacijos proceso metu nutraukiamos kryžminės jungtys tarp S–S (sieros–sieros) ir C–S (anglis–siera), siekiant nepažeisti pagrindinės grandinės C–C. Todėl visų devulkanizacijos procesų metu turi būti kontroliuojama energija, reikalinga kryžminėms jungtims nutraukti. Teoriškai įmanoma nutraukti kryžmines jungtis, nepažeidžiant pagrindinės polimerų grandinės, nes tam reikalinga šiek tiek mažesnė energija. Kryžminėms jungtims nutraukti reikalingas energijos kiekis yra C–C – 348 kJ/mol, C–S – 273 kJ/mol, S–S – <227 kJ/mol (Wiśniewska et al., 2022). Devulkanizacijos pagrindiniai metodai yra pirminis smulkinimas, cheminė, ultragarsinė, mikrobangų, biologinė, termomechaninė, devulkanizacija superkritiniame CO₂ (Asaro et al., 2018).



1.4 pav. Devulkanizacijos procesas (Wiśniewska et al., 2022)

Fig. 1.4. Devulcanization process (Wiśniewska et al., 2022)

1.2.1. Pirminis apdorojimas

Pirminis apdorojimas yra ypač svarbus visame devulkanizacijos procese. Pirminio apdorojimo metu gumos atliekos smulkinamos, o tai palengvina gumos devulkanizaciją (Karger-Kocsis et al., 2013). Priklausomai nuo devulkanizuotos gumos naudojimo galimybių parenkami skirtingi gumos smulkinimo būdai (Asaro

et al., 2018). Pagrindiniai pirminės devulkanizacijos metodai yra smulkinimas nekeičiant terminių savybių, kriogeninis, šlapiasis (Saputra et al., 2021).

1.2.2. Smulkinimas nekeičiant gumos terminių savybių

Gumos atliekos smulkinamos mechaniniu būdu aplinkos temperatūroje. Mechaninis smulkinimas atliekamas specialiuose malūnuose (Costamagna et al., 2022). Priklausomai nuo malūno tipo ir to, kiek kartų pakartotinai smulkinamos vulkanizuotos gumos atliekos, gaunamos skirtingo dydžio gumos granulės. Šis metodas yra paprastas, nereikalauja daug energijos išteklių, yra palyginti pigus ir paprastai taikomas. Metodo trūkumai yra šie: karštis, susidaręs proceso metu, gali oksiduoti ir suardyti gumos granules; šis metodas tampa labai brangus, kai norima išgauti ypač mažo dydžio gumos granules (Meysami, 2012).

1.2.3. Kriogeninis smulkinimas

Kriogeninio smulkinimo metu vulkanizuotos gumos granulės yra šaldomos skystuoju azotu. Sušaldytos gumos atliekos smulkinamos specialiuose malūnuose. Šis metodas leidžia gauti mažesnio dydžio gumos granules. Be to, šis metodas yra spartus ir draugiškas aplinkai. Paprasto ir kriogeninio smulkinimo metu gumos granulės skiriasi savo vidine ir išorine struktūra. Kriogeninio metodo būdu gautos gumos granulės yra lygios, o gaunamas gumos granulių dydis gali labai skirtis priklausomai nuo poreikio. Kriogeninio smulkinimo būdas yra brangesnis, lyginant su paprastuoju smulkinimu, nes papildomai naudojamas skystasis azotas. Taip pat reikalingas papildomas etapas, kai gumos granulės turi būti džiovinamos siekiant iš jų pašalinti drėgmę (Dorigato et al., 2022).

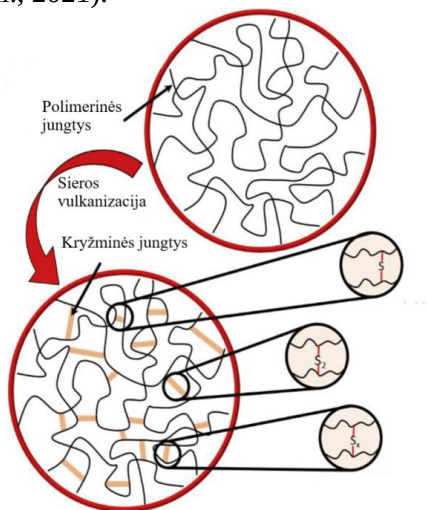
1.2.4. Šlapiasis smulkinimas

Šlapiojo smulkinimo metu vulkanizuotos gumos granulės yra maišomos su vandeniu, kuris atlieka dvi funkcijas – skatina slydimą ir veikia kaip aušinimo skystis. Šis metodas leidžia gauti labai mažo skersmens gumos granules (10–20 µm), ir galutinis produktas yra be jokių priemaišų. Kitas šlapiojo smulkinimo būdas – naudoti vandens srovę. Juo siekiama perdirbti kietas ir didelių gabaritų gumos atliekas, pvz., sunkvežimių, ūkio technikos padangas. Šiuo metodu gautos gumos granulės turi mažai priemaišų ir didelį specifinį paviršiaus plotą. Smulkinimas vandens srove yra draugiškas aplinkai, nes tas pats vanduo gali būti naudojamas pakartotinai, mat vandens ciklo sistema yra uždara. Toks smulkinimas nereikalauja daug energijos išteklių, taip pat nesukelia didelio garso.

Gautos smulkios gumos granulės gali būti naudojamos aukštos kokybės gumos kompozitams gaminti (Sienkiewicz et al., 2012, 2017).

1.2.5. Cheminė devulkanizacija

Cheminės devulkanizacijos metu naudojamos cheminės medžiagos, kurios padeda sulaužyti anglies–sieros (C-S) ir sieros–sieros (S-S) jungtis (Gumede et al., 2022; Saputra et al., 2021).



1.5 pav. Molekulinės struktūros pokytis vulkanizacijos metu (Saputra et al., 2021)

Fig. 1.5. Change in molecular structure during vulcanization (Saputra et al., 2021)

Taikant šį metodą, siekiant paspartinti devulkanizacijos procesą, papildomai naudojama terminė ir mechaninė energija (Azarabtin et al. 2022). Cheminės devulkanizacijos metu kaip cheminiai agentai dažniausia naudojami disulfidai (Wang et al., 2022) (difenilo disulfidas, tiofenoliai, cinko druskos), triolaminas (Saputra et al., 2021; Molanorouzi et al., 2016), hidroksidas arba chlorintieji angliavandeniliai (Wang et al., 2023).

Cheminė devulkanizacija yra kompleksinis procesas. Gumos atliekos sumaišomos su cheminiais agentais ir devulkanizacija vyksta kontroliuojant temperatūrą ir slėgį. Difenilo disulfidas yra dažniausiai naudojamas cheminis agentas, tačiau šiam metodui reikalinga aukšta temperatūra. Difenilio disulfidas (DD) skatina oksidacinį sieros jungčių skaidymą ir reaguoja su radikalais. Tai sukelia gumos degradaciją nutraukiant kai kurias pagrindines grandines. Vykstant reakcijai tarp DD ir gumos, kai kurie produktai, tokie kaip vandenilio sulfidas

(H₂S) ir tioliai (RSH), yra paleidžiami. Cheminė devulkanizacija vykdoma keturiais etapais:

1. Terminis difenilio disulfido skilimas sukuria du reaktyvius radikalus.
2. Radikalai reaguoja su kryžminių ryšių vietomis ir sulaužo sieros jungtis.
3. Kitas sulfido radikalas pritraukia vieną vandenilio atomą iš pagrindinės polimerinės grandinės ir sukuria naują aktyvią kryžminę jungtį.
4. Tokiu metodu devulkanizuota guma gali būti iš naujo vulkanizuojama arba maišoma su žaliavine guma (Asaro et al., 2018).

1.2.6. Ultragarsinė devulkanizacija

Taikant ultragarsinį metodą tam tikro lygio ultragarsinės bangos nukreipiamos į vulkanizuotas gumos atliekas. Ultragarso bangos sulaužo chemines jungtis tarp anglies–sieros (C–S), sieros–sieros (S–S) nelaužant anglies–anglies (C–C) jungčių. Tačiau esant tam tikram slėgiui ir temperatūrai, ultragarsas gali suskaidyti ir C–C jungtis, todėl taikant šį metodą būtina užtikrinti tinkamas sąlygas. Po devulkanizacijos ultragarsu gumos gali būti iš naujo vulkanizuojamos ir iš jų gaminami nauji gumos gaminiai. Remiantis kitų autorių tyrimais nustatyta, kad ultragarsinis metodas tinkamiausias labai smulkioms, pudros frakcijos gumos granulėms devulkanizuoti. Ultragarsinis devulkanizacijos metodas – vienas iš paprasčiausių devulkanizacijos procesų, leidžiantis kontroliuoti devulkanizuotos gumos savybes. Šiuo metodu galima pasiekti aukštą devulkanizacijos laipsnį. Ultragarsinės devulkanizacijos procesas yra tinkamas naudoti pramonėje, kai jis vyksta ekstruderyje (Isayev et al., 2014; Mangili et al., 2015).

1.2.7. Mikrobangų devulkanizacijos metodas

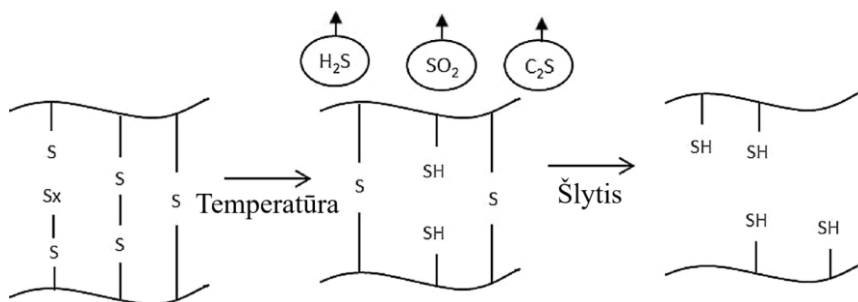
Taikant šį metodą mikrobangos naudojamos molekulių judėjimui sukelti, taip padidinant gumos temperatūrą. Dėl to skersinės jungtys nutrūksta. Mikrobangos gali būti lengvai kontroliuojamos siekiant suskaidyti sieros–sieros (S–S) ir anglies–sieros (C–S) jungtis, nesulaužant anglies–anglies (C–C) jungčių. Norint sėkmingai atlikti mikrobangų devulkanizaciją, guma turi būti polinė, kad kuo greičiau įkaistų. Taikant mikrobangų devulkanizacijos metodą naudojamos 915 arba 2450 MHz dažnio bangos, kurių energija siekia nuo 325 iki 1404 kJ/kg. Mikrobangų metodas leidžia devulkanizuoti gumą be didelio poveikio medžiagų fiziniams ir mechaniniams savybėms. Atliekant šio tipo devulkanizaciją, svarbu kontroliuoti energijos kiekį, siekiant minimizuoti gumos irimą (Vahdatbin et al., 2022).

1.2.8. Biologinis metodas

Taikant biologinį metodą naudojami specialūs mikroorganizmai, kurie sulaužo selektyviai atrinktas sieros jungtis vulkanizuotoje gumoje. Devulkanizacija vyksta tik gumos paviršiuje, todėl devulkanizacijos procesas vyksta labai lėtai. Kadangi devulkanizacija gali vykti iki 40 dienų, toks metodas nėra taikomas pramonėje. Remiantis literatūra, biologinės devulkanizacijos metu naudojamos bakterijos sfingomonos (lot. *Sphingomonas*), kurių devulkanizacijos laikas yra apie 20 dienų. Taip pat naudojamos aliciklobacilos (lot. *Alicyclobacillus*) bakterijos, skirtos latekso gumos atliekoms perdirbti (Tatangelo et al., 2016). Šiuo metu biologinės devulkanizacijos metodas yra tik tiriamas. Yra tik keletas bakterijų padermių, kurios gali suskaidyti gumos sieros jungtis. Dėl ilgo procedūros laiko ir bakteriologinio užteršimo rizikos, šis metodas taikomas tik laboratorijose (Asaro et al., 2018).

1.2.9. Termomechaninis metodas

Termomechaniniame procese gumos atliekos yra veikiamos šlyties deformacijos tam tikroje temperatūroje. Vykstant šlyties deformacijai, gumos atliekos tempiamos dviem lygiagrečiomis kryptimis, taip nutraukiant ryšių jungtis. Šio tipo devulkanizacija atliekama esant aukštam slėgiui maišytuvuose arba ekstruderyje. Devulkanizacijos metu gali būti pridėti priedai, pavyzdžiui, aliejai arba regeneruojančios medžiagos.



1.6 pav. Termomechaninė devulkanizacija (Asaro et al., 2018)

Fig. 1.6. Thermomechanical devulcanization (Asaro et al., 2018)

Termomechaninis devulkanizacijos būdas yra gerai ištirtas ir taikomas pramoniniu mastu (Costamagna et al., 2022).

1.2.10. Devulkanizacija superkritiniame CO₂

Superkritinė būseną yra tam tikra agregatinė būseną, kurioje medžiaga yra tarpinėje fazėje tarp dujų ir skysčio. Bet kokia medžiaga gali pasiekti tokią būseną, kai temperatūra ir slėgis viršija kritinį tašką. Todėl dujos negali būti suskystintos slėgiu, viršijančiu kritinę temperatūrą. Dėl to, kad medžiagos nėra skystosios / dujinės fazės, superkritiniai skysčiai neturi paviršiaus įtempimo. Fizinės skysčio savybės gali būti keičiamos plačiu diapazonu kintant jo temperatūrai ir slėgiui. Superkritiniai skysčiai turi tirpiklio savybes, bet taip pat gali būti transportuojamos kaip dujos. Superkritiniai skysčiai gali ištirpinti tirpias medžiagas ir prasiskverbti į kietųjų medžiagų poras. Nors superkritinių skysčių agregatinė būseną yra skystoji, bet difuziškumas ir klampumas yra tarpiniai tarp dujų ir skystosios vertės.

Pastaraisiais metais buvo pasiūlytas superkritinis anglies dioksidas (scCO₂) kaip tvari devulkanizacijos terpė (Gumede et al., 2022). Jis yra chemiškai neaktyvus, netoksiškas, nedegus ir nebrangus. Be to, jo kritinis taškas pasiekiamas žemoje temperatūroje (~31,1 °C) ir žemame slėgyje (~7,38 MPa). scCO₂ perteklius gali būti lengvai ir greitai pašalinamas sumažinant slėgį. Devulkanizavimas scCO₂ dar nėra gerai ištirtas, tačiau yra siūlomi tam tikri sprendimai. Šiuo metodu iki 78 % gumos granulių gali būti visiškai devulkanizuotos (Meysami et al., 2017). Esant superkritinei būsenai, CO₂ išpučia medžiagą, o tai leidžia prasiskverbti devulkanizuojantiems reagentams. Tai leidžia devulkanizacijos reakcijai vykti visame gumos tūryje, o tai labai pagreitina proceso efektyvumą. Be to, CO₂ išpučia gumą ir ištempia sieros jungtis, todėl jas lengviau sulaužyti. Taip pat tyrinėjami kombinuoti devulkanizacijos metodai, paremti mechanine devulkanizacija ekstruderyje, papildomai naudojant superkritinį CO₂. Tyrimais buvo nustatyta, jog papildomas superkritinio CO₂ naudojimas pagerina devulkanizacijos laipsnį ir medžiagos tąsumo savybes (Wang et al., 2021).

Termomechaninė devulkanizacija naudojant superkritinį CO₂ yra laikoma efektyviu, ekologišku ir netoksišku metodu. Tikslus superkritinio CO₂ naudojamas yra vis dar tiriamas. Norint pasiekti aukštą devulkanizacijos lygį taikant šį metodą, proceso parametrai, tokie kaip temperatūra, greitis, tiekimo greitis ir kt., turi būti optimizuoti (Asaro et al., 2018).

1.3. Kelių sluoksnių konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo tyrimai

Siekiant sumažinti triukšmo poveikį aplinkai, ieškoma įvairių būdų jį izoliuoti. Šiuo metu aplinkoje veikia daug skirtingų triukšmo šaltinių. Transporto triukšmas – vienas pagrindinių triukšmo šaltinių aplinkoje, jam mažinti skirta

daug įvairių triukšmą mažinančių priemonių, tokių kaip garso barjerai, tylusis asfaltas, kurio sudėtyje naudojama guma, tvarus transporto srautų planavimas ir t. t. Tačiau ne vien transportas veikia aplinkoje ir sukelia nepageidautiną triukšmo lygį. Šiuolaikiniuose pastatuose veikia įrenginiai, kurie padeda užtikrinti komfortą patalpose. Tai kondicionavimo, oro tiekimo sistemos, aušyklės ir kt. Taip pat viena iš problemų yra dyzelinių generatorių naudojimas viešosiose erdvėse, parkuose, siekiant užtikrinti elektros tiekimą įrenginiams. Tačiau visų šių įrenginių sukeliamas triukšmas neigiamai veikia aplinką. Dėl šios priežasties ieškoma įvairių būdų, kaip slopintų jų sukeliamą triukšmo lygį. Šiais laikais kuriamos inovatyvios technologijos, kurios įdiegiamos jau projektuojant įrenginius, siekiant sumažinti jų triukšmo lygį, tačiau inovacijos yra labai brangus ir daug laiko atimantis procesas. Siekiant ekonomiškesnių sprendimų, paprasčiau yra sumažinti triukšmo lygį įrengiant garso barjerus, akustines užuolaidas ar gaubtus, kurie gana efektyviai sumažina į aplinką sklindantį triukšmą. Todėl svarbu sukurti palyginti plonas ir lengvas konstrukcijas, kurias galima būtų sumontuoti prireikus ir lengvai išardyti. Šiuo metu kuriamos kelių sluoksnių konstrukcijos, kurias sudaro skirtingo tankio, stiprumo ir dinaminių savybių plokštės. Dažnu atveju papildomai naudojamos medžiagos ir perdirbtų atliekų – gumos, plastiko ir kt. Pagrindinis parametras, apibrėžiantis tokių konstrukcijų efektyvumą, yra garso izoliacija, kuri nustatoma laboratorinėmis sąlygomis. Tokie tyrimai šiais laikais domina daug mokslininkų. Mokslininkai nustatinėja tinkamiausius modeliavimo metodus, skirtus kelių sluoksnių konstrukcijoms. Vieni žinomiausių teorinių modelių aprašyti Cremer et al. (2005), London (1950), Sharp (2007), Brekke (1981), Davy (2009), Brunkskog (2012) darbuose. Dažniausiai visi metodai yra paremti masės dėsnio. Masės dėsnio modelis yra ypač svarbus homogeninėms vienguboms konstrukcijoms, nes, nepaisant rezonansinių dažnių, kurie sumažina garso izoliaciją ties kritiniais dažniais, tokių pertvarų garso izoliacinės savybės gali būti lengvai įvertinamos. Masės dėsnis taip pat gali būti taikomas pertvaroms, kuriose du kieti sluoksniai yra sujungti standžiai be oro tarpo (Kosała, 2019). Garsą izoliuojančios konstrukcijos gali būti skirstomos į viengubas ir dvigubas. Viengubose konstrukcijose yra vienas arba keli skirtingi medžiagų sluoksniai, tačiau jie yra tvirtai tarpusavyje sujungti ir neturi oro tarpo. Dvigubos konstrukcijos yra iš dviejų sluoksnių, kurie tarpusavyje atskirti oro tarpu. Viengubos konstrukcijos dažnu atveju yra plonesnės ir naudojamos įvairių garsą izoliuojančių gaubtų ar barjerų gamyboje. Dvigubos konstrukcijos naudojamos pastatų pertvarų, dažniausiai gipsinėse sienų konstrukcijose. Jos pasižymi papildomais masės–oro–masės rezonansais. Tokių konstrukcijų trūkumas tas, jog esant žemesiems dažniams jų garso izoliacija yra žemesnė, tačiau ypač išauga esant aukštesiems dažniams.

Kuriant viengubas kelių sluoksnių sistemas, gali būti naudojamos skirtingos medžiagos, kurių deriniai, siekiant užtikrinti kuo aukštesnę garso izoliaciją.

Pagrindinis tokių konstrukcijų principas – kuo didesnė masė, tuo geresnė garso izoliacija. Tačiau yra ir kitų svarbių neakustinių parametrų, kurie veikia tokių konstrukcijų rezonansines savybes. Kelių sluoksnių konstrukcijos sudaromos iš garsą sugeriančių arba garsą izoliuojančių plokščių. Visos skirtingos plokštės dėl savo dinaminių, mechaninių savybių turi skirtingus rezonansinius dažnius. Projektuojant garsą izoliuojančias konstrukcijas, nepakanka užtikrinti tik kuo didesnės garso izoliacijos. Ypač svarbu parinkti tokias konstrukcijas, kurių rezonansiniai dažniai nesutaptų su įrenginių sukeliama triukšmo rezonansiniais dažniais.

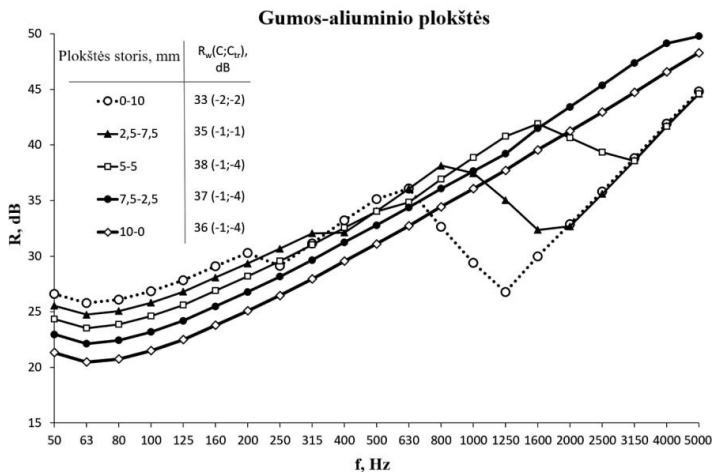
Dažnu atveju kuriant kelių sluoksnių konstrukcijas, dėmesys kreipiamas į jų svorį, todėl dažniausiai naudojamos tradicinės medžiagos, pvz., metalinės plokštės, ir plaušinės plokštės, pvz., mineralinė vata (Hassani et al., 2021; Ehsan Samaei et al., 2021). Literatūroje didžiausias dėmesys skiriamas homogeninėms medžiagoms – plienui, aliuminiui, organiniam stiklui, taip pat jų kombinacijoms su mineraline vata. Mokslininkas Kosala atliko gaubto, sudaryto iš minėtų medžiagų, įneštinio silpninimo tyrimą (Kosala et al., 2020).



1.7 pav. Garsą izoliuojantis gaubtas: a – plieninis karkasas be sienų ir su įvairiakrypčiu garso šaltiniu; b – plieninis karkasas su sienelėmis iš mineralinės vatos ir aliuminio derinio (Kosala et al., 2020)

Fig. 1.7. Sound insulating enclosure: a – steel frame without walls and with an omnidirectional sound source; b – steel frame with walls made of mineral wool-aluminium composition (Kosala et al., 2020)

Taip pat buvo atliekami panašūs tyrimai su plieno, aliuminio ir gumos plokštėmis, kartu derinant jas su gumos plokštėmis, sudarant viengubą kelių sluoksnių sistemą (Kosala, 2019). Visi tyrimai buvo lyginami su esamais teoriniais modeliais.



1.8 pav. Skirtingo storio gumos ir aliuminio konstrukcijų garso izoliacijos vertės R palyginimas: 0–10, 2,5–7,5, 5–5, 7,5–2,5 ir 10–0 mm (Kosała, 2019)

Fig. 1.8. Comparison of the R -value of sound insulation of rubber-aluminum structures of different thicknesses 0–10, 2.5–7.5, 5–5, 7.5–2.5 and 10–0 mm (Kosała, 2019)

Tyrimų metu nustatyta, jog, keičiant aliuminio ir gumos storio santykį, galima koreguoti konstrukcijos kritinį dažnį. Nustatyta, jog, didinant gumos granulių sluoksnį ir mažinant aliuminio sluoksnį, kritinis dažnis slenka link aukštesniųjų dažnių. Vertinant bendrai gautus mokslininko rezultatus ir atlikus palyginimus su teoriniais modeliais, buvo nustatyta, jog tokios konstrukcijos garsą izoliuoja pagal masės dėsnį ir atitinka viengubų plokščių teoriją.

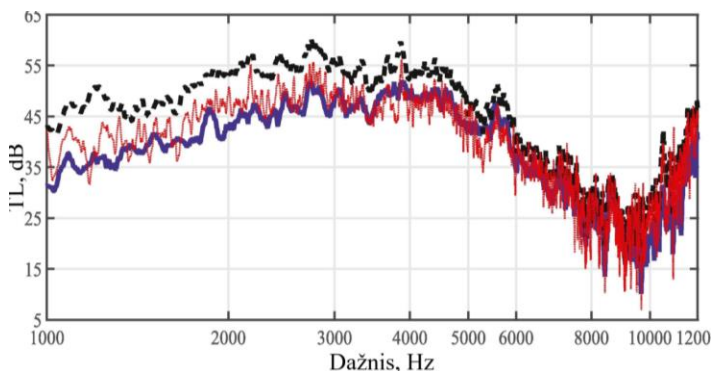
Konstrukcijos, kuriose panaudotos metalo, aliuminio plokštės ir kartu jas kombinuojant su plaušinėmis medžiagomis ar gumos plokštėmis, pasižymi aukštais rezultatais esant vidutiniams ir aukštiesiems dažniams, tačiau tokių konstrukcijų problema – garso izoliacija esant žemesiems dažniams (Zarastvand et al., 2022). Todėl žemojo dažnio garso izoliacijos problema dvigubose konstrukcijose šiuo metu yra įdomi tema.

Taip pat yra kuriamos ir kelių sluoksnių konstrukcijos, kurias sudaro dvi tvirtos plokštės, tarp kurių dedama poringoji medžiaga. Tokios konstrukcijos pasižymi geromis stiprumo savybėmis ir yra lengvesnės už alternatyvias plokštes. Tačiau tokių konstrukcijų akustinės savybės gali būti paprastesnės, nes jų rezonansiniai dažniai yra didesni negu sunkių vienalyčių konstrukcijų (pvz., mūras). Tačiau yra būdų pagerinti dvigubų konstrukcijų garso izoliacines savybes. Vibracijos ir rezonansiniai dažniai gali būti kontroliuojami naudojant vibracijas slopinančias medžiagas (pvz., gumą, elastomerus). Kelių sluoksnių plokštės

pasižymi skirtingomis mechaninėmis savybėmis, atsižvelgiant į medžiagos formą ir tipą. Skirtingi rezultatai gaunami į kelių sluoksnių konstrukcijas dedant mineralinę vatą, poliuretaną, gumą, nes skiriasi šių medžiagų akustinės ir dinaminės savybės. Šiais laikais garso perdavimo sumažėjimo tyrimai per sluoksningas poringąsias plokštes tapo labai aktualūs. Tyrejai pateikia nemažai skaitinių ir analitinių metodų. Yra tyrimų, kuriais nustatyta šlyties efekto įtaka konstrukcijoms ir atsižvelgiant į tai sukurtos skaičiavimo formulės vertinant garso perdavimo sumažėjimą (Zergoune et al., 2017). Tokių skaičiavimų rezultatų tikslumas priklauso nuo baigtinių elementų modeliui pasirinktos dažnio srities.

Oliazadeh et al. (2018, 2019) atliko eksperimentinius tyrimus aidėjimo kameroje ir ištyrė garso perdavimą per viengubas ir dvigubas plokštes, derindami jas su garsą sugeriančiomis medžiagomis.

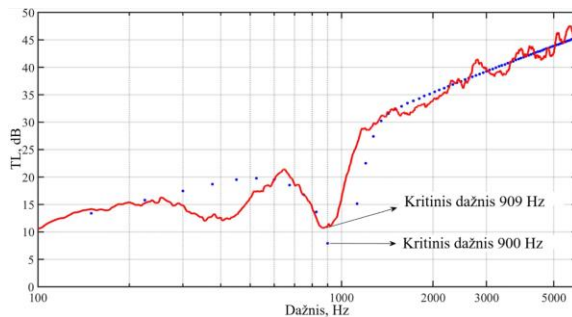
Zhou et al. (2010) pateikė dviejų keliasluoksnių konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertės, taikydami perdavimo sumažėjimo metodą, pagrįstą garso slėgio lygių matavimu.



1.9 pav. Konstrukcijos su garsą sugeriančia medžiaga ant viengubos plokštės garso perdavimo sumažėjimo tyrimai: – garsą sugerianti medžiaga iš triukšmo šaltinio pusės; – garsą sugerianti medžiaga iš priimtovo pusės; ---- – vienguba konstrukcija be sugeriančios medžiagos (Oliazadeh et al., 2019)

Fig. 1.9. Studies of transmission loss of construction with sound-absorbing material on a single plate: – absorbing material on the source side; – absorbing material on the receiving side; ---- – single-walled plate without absorbing material (Oliazadeh et al., 2019)

Oliazadeh taip pat atliko korėtų sluoksnių plokščių eksperimentinius garso perdavimo sumažėjimo tyrimus ir palygino rezultatus su analitiniais metodais (Oliazadeh et al., 2022).



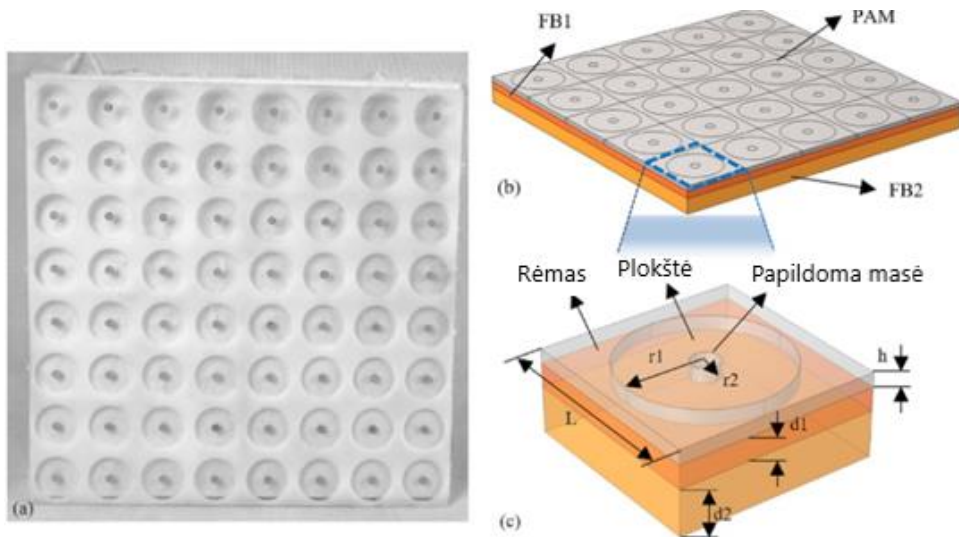
1.10 pav. Korėtų sluoksnių plokščių eksperimentinių ir analitinių garso perdavimo sumažėjimo rezultatų palyginimas (Oliazadeh et al., 2022)

Fig. 1.10. Comparison of experimental and analytical sound transmission reduction results of honeycomb sandwich panels (Oliazadeh et al., 2022)

Kuriant ir tiriant kelių sluoksnių konstrukcijas, ypač svarbu jas įvertinti pagal teorinius modelius, siekiant prognozuoti jų rezonansinius dažnius. Pagal masės dėsnį, norint pasiekti norimus akustinius parametrus, dažnai reikia naudoti sunkesnes akustines medžiagas, o tai dažnu atveju nėra tinkama pramonėje. Todėl šiais laikais kuriamos metamedžiagos. Pagrindinis akustinių metamedžiagų pranašumas tas, kad jos gali turėti daug pranašumų žemojo dažnio garso izoliacijos srityje esant mažesniai svoriui. Didelę akustinių metamedžiagų garso izoliaciją lemia medžiagų dinaminės, o ne akustinės savybės. Todėl kuriamos membraninio tipo kelių sluoksnių konstrukcijos. Membranos tipo akustinėje metamedžiagoje plokštė ir įtempta membrana yra pritvirtinta prie standaus rėmo, o veikimo dažniai nustatomi atsižvelgiant į rezonansus (Wang et al., 2021; Yu et al., 2017).

Kelių sluoksnių konstrukcijos gali būti naudojamos kaip efektyvi garsą mažinanti medžiaga pastatų akustikos, automobilių inžinerijos srityse. Medžiagų akustinėms savybėms kurti ir optimizuoti buvo sukurta daug teorijų. Norint žinoti konstrukcijų akustines savybes, dažnai vietoj tiesioginių matavimų reikalingi teoriniai metodai (Lee & Xu, 2009).

Vienas iš būdų prognozuoti tokių konstrukcijų akustines savybes yra perdavimo matricos metodas (TMM). Šis metodas aprašomas matricomis ir yra taikomas daugelyje fizikos sričių (optika, kvantinė mechanika, akustika ir t. t.). Šis metodas leidžia ištirti bangų sklaidimą ir garso perdavimą per skirtingas terpes 1D aplinkoje. TMM turi galimybę analizuoti akustinių sistemų garso sugertį, perdavimo savybes, įvertinti efektyvumą pagal periodiškumą (Theocharis et al., 2014) ir analizuoti poringojo sluoksnio akustines savybes (Dell et al., 2021). Šiuo metodu kiekvienas konstrukcijos sluoksnis gali būti apibūdintas kaip skirtinga perdavimo matrica. Dauginant visų sluoksnių perdavimo matricas galima apskaičiuoti kelių sluoksnių konstrukcijos perdavimo koeficientą.



1.11 pav. Tipinė kelių sluoksnių metamedžiaga (a); metamedžiagos scheminis vaizdas; periodinio vieneto scheminis vaizdas (c) (Yang et al., 2023)

Fig. 1.11. Typical multilayered metamaterial (a); schematic representation of the metamaterial (b); schematic diagram of a periodic unit (c) (Yang et al., 2023)

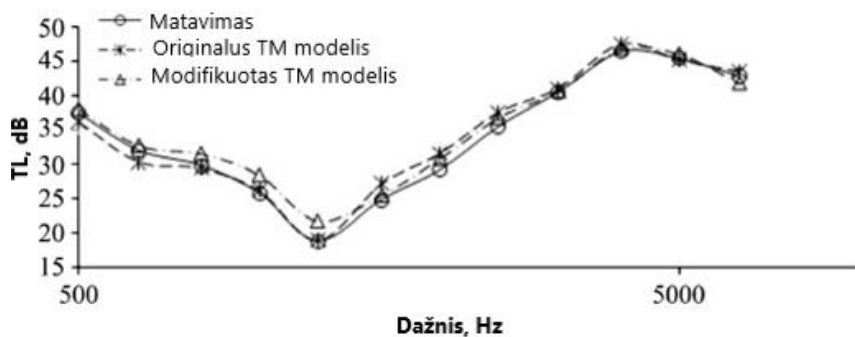
Stovinčiųjų bangų vamzdžiuose akustinį lauką sudaro ašine kryptimi sklindančios plokščiosios bangos. Mėginio, įstatyto vamzdžio viduje, garso slėgį P ir dalelių greitį V kaip du kintamuosius galima aprašyti matrica, susiejant kintamuosius dviejuose bandinio paviršiuose (Lee & Xu, 2009):

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=d}. \quad (1.1)$$

Naudojant keturis perdavimo matricos elementus T_{11} , T_{12} , T_{21} ir T_{22} , galima tiesiogiai apskaičiuoti garso perdavimo sumažėjimo vertes:

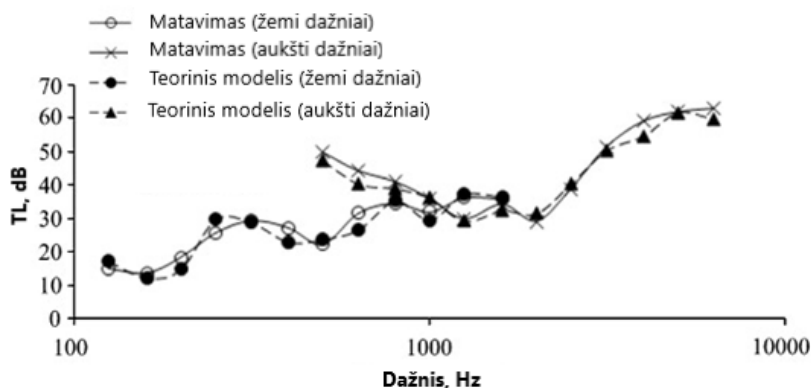
$$TL = 20 \log \left(\frac{1}{2} \left| T_{11} + \frac{T_{12}}{Z_0} + Z_0 T_{21} + T_{22} \right| \right). \quad (1.2)$$

Lee ir Xu (2009) savo darbe analizavo ir modifikavo perdavimo funkcijos metodą, papildomai įvertindami lenkimo jėgas, ir nustatė, kad originalus perdavimo funkcijos metodas gali būti pakoreguojamas atsižvelgiant į lenkimo jėgas.



1.12 pav. Gumos plokštės garso perdavimo sumažėjimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais tyrimais, originaliu ir modifikuotu perdavimo funkcijos metodu (Lee & Xu, 2009)

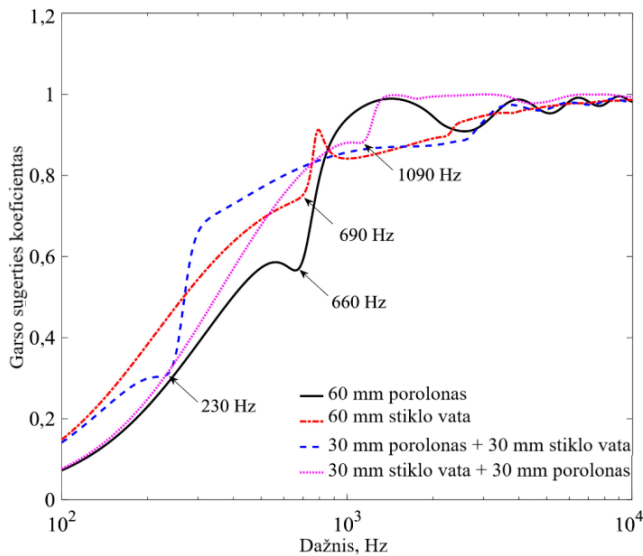
Fig. 1.12. Comparison of the sound transmission loss results of the rubber plate with experimental studies, original and modified transfer function method (Lee & Xu, 2009)



1.13 pav. Konstrukcijos su dviem sintetinės gumos plokštėmis garso perdavimo sumažėjimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais tyrimais, originaliu ir modifikuotu perdavimo funkcijos metodu (Lee & Xu, 2009)

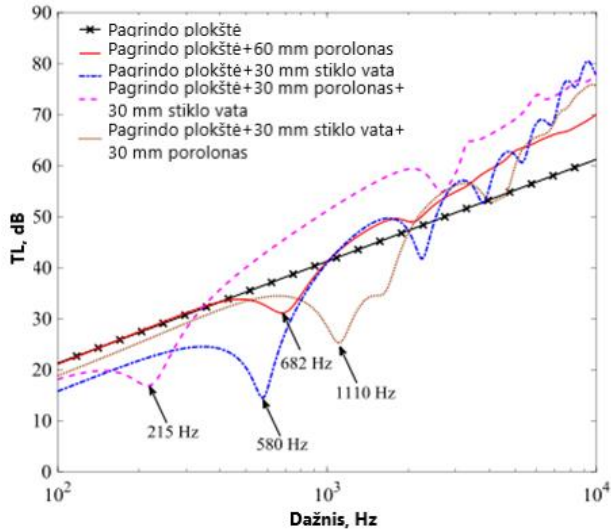
Fig. 1.13. Comparison of sound transmission loss results of structures with two synthetic rubber panels with experimental studies, original and modified transfer function method (Lee & Xu, 2009)

Deng et al. (2021) savo tyrimuose ieškojo priklausomybės tarp medžiagų garso sugerties ir garso perdavimo sumažėjimo verčių, rezultatus palygindami su perdavimo matricos metodu skaičiuotomis vertėmis.



1.14 pav. Akustinių sistemų garso sugerties koeficientas (Deng et al., 2021)

Fig. 1.14. The sound absorption coefficient of acoustic systems (Deng et al., 2021)



1.15 pav. Akustinio sluoksnio įtaka garso perdavimo sumažėjimui, naudojant ploną pagrindo plokštę, modeliuotą perdavimo funkcijos metodu (Deng et al., 2021)

Fig. 1.15. Influence of the acoustic layer on the transmission loss using a thin base plate modelled by the transfer function method (Deng et al., 2021)

Savo tyrimo metu mokslininkas Deng konstatavo, kad nėra priklausomybės tarp garso sugerties ir garso perdavimo sumažėjimo. Aukšta garso sugertis nenulemia geresnių garso perdavimo sumažėjimo verčių. 60 mm storio melamino plokštė turėjo aukščiausius garso sugerties rezultatus tarp 1000 ir 2000 Hz, tačiau rezultatai parodė, jog melamino plokštė turėjo daug prastesnius garso perdavimo sumažėjimo rezultatus. Palyginimui – mineralinės vatos plokštė turėjo žemas garso perdavimo sumažėjimo vertes tuose dažniuose, kur jos sugertis buvo didžiausia.

Apibendrinant galima teigti, jog kelių sluoksnių konstrukcijų kūrimas, naudojant įvairias medžiagas ir jų derinius, yra ypač aktualus šiais laikais. Daugybė pramonės sričių ieško būdų, kaip pritaikyti plonas ir lengvas medžiagas įrenginių triukšmui mažinti. Mokslininkai taip pat ieško įvairiausių galimybių, kaip eksperimentiškai ir analitiškai įvertinti tokių konstrukcijų efektyvumą. Todėl įvairių fizikinių teorijų pritaikymas yra ypač aktualus šiuolaikinėje akustikoje ir leidžia mokslininkams paprasčiau analizuoti kelių sluoksnių konstrukcijų akustines savybes.

1.4. Viengubų ir dvigubų garsą izoliuojančių konstrukcijų teoriniai tyrimai

Ankstyvieji dvigubų konstrukcijų garso izoliacijos analizės modeliai buvo koncentruoti į orinio triukšmo sklaidą plokštėmis, tarus, kad konstrukcijos paviršiaus plotas yra begalinis. Struktūriniai ryšiai tarp sienų nebūdavo skaičiuojami, o plokštės modeliuojamos kaip begalinės. Pirmieji buvo taikomi tik įprastoms garso bangoms, todėl skaičiavimai buvo paremti atsižvelgiant į plokštės masę ir oro tarpo plotį. Šie modeliai leido atlikti kokybinį fizinių veiksnių vertinimą, tokių kaip masės–oro–masės rezonanso suspaustoje oro erdvėje modeliavimas. 1950 m. London įvedė garso sklaidos modelį, kuris įtraukė atsitiktinai sklindančias bangas. Modelyje buvo įtrauktas plokščių standumas, kas leido papildomai analizuoti konstrukcijų rezonansus. (London, 1950). Difuzinis garso perdavimo sumažėjimas London modelyje gaunamas iš Paris lygties pagal svertinį plokščių bangos įstrižinį perdavimo nuostolių sumavimą visais dažnio kampais.

Mulholland su kolegomis išplėtė Baranek ir Work modelį įtraukdami įstrižinių bangų kritimą (Mulholland et al., 1967), o paskui išplėtė savo modelį, kad įtrauktų atspindžius ertmėje tarp dviejų plokščių (Cummings & Mulholland, 1968). Šį daugialypį refleksijos modelį galima naudoti tiriant absorbcijos poveikį oro tarpe tarp dviejų plokščių. Bangų absorbcija skaičiuojama naudojant atspindėjusių bangų slopinimo santykį plokščių sąsajos ertmėje arba ertmės kraštuose. Mokslininkas Heckl grįžo prie originalaus Baranek ir Work modelio,

kad į jį būtų įtrauktos garsą sugeriančios medžiagos, pagrįstos medžiagų standumu ploto vienetui erdmės viduje (Heckl, 1981). Jis modeliavo dvigubų sienų garso izoliaciją, sudarytą iš dviejų plonų plokščių, tarp kurių yra elastinga medžiaga. Šis modelis parodė gerus rezultatus konstrukcijose, kuriose ertmė užpildyta gerai garsą sugeriančiomis medžiagomis, bet nepakankamai įvertino konstrukcijų, kur tarp plokščių yra tik oro tarpas, garso izoliaciją. Mokslininkas Fahy Baranek ir Work modeliuose įvedė lygiavertį skysčio modelį, kuris leido analizuoti tuščiavidures erdves tarp dviejų plokščių (Fahy, 2003; Fahy & Gardonio, 2007). Au ir Byrne (1987, 1990) modeliuose aprašė poringųjų sluoksnių, nepralaidžių barjerų ir oro erdvių įtaką garso izoliacijai (Kurra & Ardit, 2001). Kang et al. (2000) palygino ankstesnių modelių rezultatus su eksperimentiniais duomenimis ir nustatė, jog yra priklausomybė nuo garso bangos kritimo kampo į medžiagos paviršių. Kuo jis didesnis, tuo garso izoliacija didesnė. Įrašius Gauso lygtis į Paris formulę, buvo paprasčiau prognozuoti garso izoliaciją konstrukcijose su oro tarpais. Dėl žemųjų dažnių anksčiau aptarti modeliai nukrypsta nuo eksperimentinių rezultatų dėl sienų modalinio elgesio. Mokslininkas Donato pasiūlė pataisyti galutinį sienų dydį, naudojant Beranek ir Work bei London modelių bangos skaičiaus metodą. Šis pataisymas gali būti taikomas visiems ankstesniems modeliams, kuriuose imamas begalinis plokščių dydis. Jis taip pat supaprastino Paris lygtyje gautus integralus, kad juos būtų galima vertinti analitiškai (Donato, 1972).

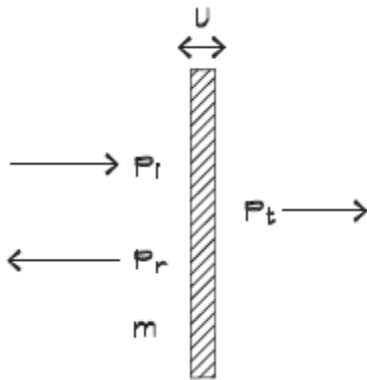
Ankstesniuose modeliuose į skaičiavimus nebuvo įtraukti sujungimai tarp dviejų plokščių. Standžios jungtys tarp atitvaros plokščių, vadinamų akustiniais tiltais, buvo įtrauktos mokslininko Sharp (2007), vėliau Cremer et al. (2005). Šie modeliai pagrįsti tuo, kad garsas perduodamas struktūriškai per sienas ir oriniu būdu, darant prielaidą, jog abi plokštės neturi įtakos viena kitai. Sharp pritaikė London modelį garso sklaidai akustiniais keliais apskaičiuoti. Jungiamos plokštės ir standūs karkasai modeliuojami kaip spyruoklės. Vėliau šį metodą pritaikė Brunskog savo modelyje, atsižvelgęs į sąveiką tarp standžių karkasų (Brunskog, 2005). Kiti autoriai taip pat pateikė išplėstinius modelius, taikomus lanksčiosioms jungtims, kai jos modeliuojamos kaip serija spyruoklių (Davy, 2009, 2010a; Gu & Wang, 1983; Poblet-Puig et al., 2009; Vigran, 2010), tačiau šis lanksčiųjų jungčių modeliavimas yra labai apytikslis (Van den Wyngaert et al., 2018).

Ankstesniais teoriniais modeliais atitvara buvo modeliuojama tarus, kad garso laukas perdavimo patalpose laikomas difuziniu. Atitvaros konstrukcijos išskirtomos į homogenines sistemas su sąlyga, kad kiekvienas posistemis turi difuzinį lauką. Kiekvienam posistemii būdingas tik vienas parametras – bendra energija. Stacionarūs energijos srautai tarp posistemių yra modeliuojami apytiksliai. Garso izoliacija ore gali būti apskaičiuojama pagal viso perdavimo energijos ir priimančio kambario energijos santykį. Pagrindinis tokių modelių

trūkumas tas, jog oro tankis erdmėje ignoruojamas, todėl šiuose modeliuose nėra masės–oro–masės rezonanso (Van den Wyngaert et al., 2018).

Šiuo metu daugelis mokslininkų stengiasi kuo tiksliau teoriškai prognozuoti viengubų ir dvigubų konstrukcijų garso izoliacijos rodiklį, remdamiesi eksperimentiniais tyrimais. Teoriniai modeliai dažniausiai koncentruoti į garso izoliacijos rodiklio prognozavimą. Didelį darbą šioje srityje atliko mokslininkai Davy (2009), Sharp (2007), Craik et al. (2000). Didžioji dalis tyrimų yra susiję su viengubų atitvarų, sudarytų iš kelių standžiai sutvirtintų sluoksnių garso izoliacijos prognozavimu. Dažniausiai tai yra dvi tvirtos, tankios plokštės, tarp kurių yra mažo tankio medžiaga. Tačiau yra gana sunku rasti patikimą modelį, kuris leistų tiksliai prognozuoti dvigubas plokštes, kurios dažniausiai ir yra naudojamos gyvenamosiose patalpose. Yra tyrimų, kuriais bandoma pritaikyti viengubų konstrukcijų modelius, išplečiant juos iki dvigubų (Hwang et al., 2015). Keičiant įprastus Davy (2009, 2010b) ir Sharp (2007) pasiūlytus modelius ir papildant juos empirinėmis formulėmis, galima prognozuoti dvigubas konstrukcijas.

Garso bangai sklindant laisvame lauke ir susiduriant su vienguba konstrukcija, slėgis veikia konstrukciją, dėl to kyla judėjimas, kuris savo ruožtu perduodamas į priešingą konstrukcijos pusę. Bendrasis slėgis, veikiantis plokštę išilgai normalės, pasiskirsto taip, kaip nurodyta 1.16 pav.



1.16 pav. Garso slėgio pasiskirstymas plokštėje (Long, 2014)

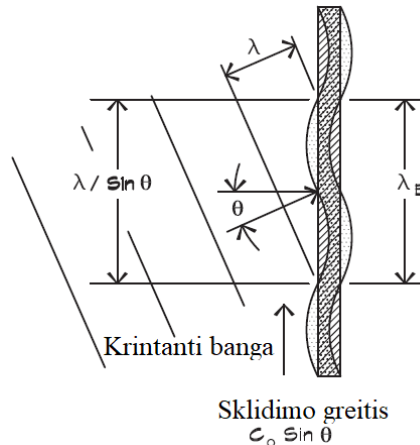
Fig. 1.16. Sound pressure distribution in a plate (Long, 2014)

Plokštę veikiant garso bangos slėgiui, joje atsiranda tam tikros sąveikos, kurios daugiausia priklauso nuo plokštės masės. Todėl viengubos konstrukcijos garso slėgio lygio sumažėjimas skaičiuojamas remiantis masės dėsniu, aprašytu pagal (1.3) formulę:

$$R = 20 \log(fm_s) - K_R, \quad (1.3)$$

čia R – difuzinio lauko garso lygio sumažėjimas, dB; f – dažnis, Hz; m_s – medžiagos masė, tenkanti ploto vienetui, kg/m²; K_R – skaitinė konstanta, lygi 47,3 dB.

Masės dėsnis parodo, kiek garso lygis sumažėja esant tam tikram dažniui ir šis dydis priklauso tik nuo plokštės masės. Remiantis formule galima nustatyti, jog garso lygio sumažėjimas padidėja 6 dB, dvigubai padidinus medžiagos masę arba dažnį. Viengubų konstrukcijų garso izoliacija priklauso nuo trijų dalykų: masės, lenkimo jėgų ir kampinės deformacijos. Esant žemesiems dažniams dominuoja masė, esant aukštiesiems dažniams – lenkimo ir kampinės deformacijos jėgos. Plonas konstrukcijas yra lengviau sulenkti nei deformuoti, todėl labiau dominuoja lenkimo jėga. Kai lenkimo bangos greitis tampa toks pats kaip ir orinio garso bangos greitis, konstrukcijoje susidaro rezonansinis dažnis. Kai slėgio minimumai ir maksimumai erdvėje sutampa, kaip parodyta 1.17 pav., energija lengvai perduodama iš oro į konstrukciją ir atvirkščiai.



1.17 pav. Rezonansinis dažnis, kai lenkimo bangos greitis sutampa su orinio garso bangos greičiu (Long, 2014)

Fig. 1.17. Resonant frequency at which the speed of the bending wave matches the speed of the airborne sound wave (Long, 2014)

Dažnis, kur dėl rezonanso garso izoliacija stipriai sumažėja, vadinamas kritiniu dažniu ir aprašomas pagal (1.4) formulę:

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_s}{B}} = \frac{c_0^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12(1-\sigma^2)\rho_m}{E}}, \quad (1.4)$$

čia c_0 – garso greitis, m/s; h – konstrukcijos plotis, m; ρ_m – tankis, kg/m³; σ – Puasono koeficientas; E – Jungo modulis, GPa.

Garso izoliacija ties kritiniu dažniu skaičiuojama pagal (1.5) formulę:

$$R(f = f_c) \cong 2 \log \left(\frac{\omega_c m_s}{2 \rho_0 c_0} \right) + 10 \log \left(\frac{2\eta}{\pi} \left(\frac{\Delta f}{f_c} \right) \right), \quad (1.5)$$

čia ω_c – radialinis dažnis $2\pi f$, rad/s; m_s – konstrukcijos masė, kg/m²; ρ_0 – oro tankis, kg/m³; Δf – dažnis, Hz; f_c – kritinis dažnis, Hz; η – sumažėjimo koeficientas ($\eta < 1$).

Garso izoliacija virš kritinio dažnio apskaičiuojama pagal (1.6) formulę:

$$R(f > f_c) \cong 20 \log \left(\frac{\omega m_s}{2 \rho_0 c_0} \right) + 10 \log \left(\frac{2\eta}{\pi} \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) \right). \quad (1.6)$$

Skaičiuojant storas viengubas konstrukcijas, atsiranda dar vienas svarbus dažnis, kuris priklauso nuo kampinės deformacijos jėgų. Sankirtos taškas tarp lenkimo ir kampinės deformacijos jėgų yra tada, kai lenkimo bangos ilgis lygus konstrukcijos pločiui. Kai konstrukcijos plotis tampa didesnis už lenkimo bangos ilgį, atsiranda kampinė deformacija, o ją nurodantis dažnis apskaičiuojamas pagal (1.7) formulę:

$$f_s = \frac{c_0^2(1-\sigma)}{59h^2 f_c}. \quad (1.7)$$

Kai kampinės deformacijos dažnis yra žemiau kritinio dažnio, garso izoliacija gali sumažėti lyginant su ta, kuri skaičiuojama pagal masės dėsnį. Jeigu kampinės deformacijos dažnis yra aukščiau kritinio dažnio, tada deformacinės bangos garso izoliacijos didėjimą apriboja iki 6 dB per oktavą.

Plonoms konstrukcijoms esant žemiesiems dažniams taip pat svarbus rezonansinis dažnis, kuris priklauso nuo konstrukcijos matmenų ir masės. Jis apskaičiuojamas pagal (1.8) formulę:

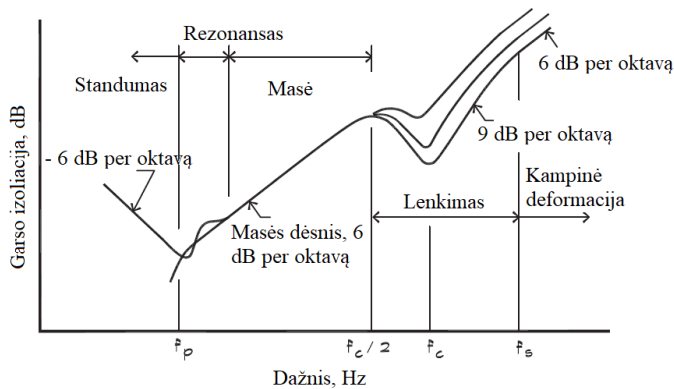
$$f_p = \gamma \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{m_s}} \left(\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right), \quad (1.8)$$

čia γ – koeficientas priklausantis nuo konstrukcijos įtvirtinimo, paprastai įtvirtintoms konstrukcijoms $\gamma = 1$, suspaustoms $\gamma \approx 1,3$ iki 2; $m = n = 1$; a, b – konstrukcijos matmenys, m; B – lenkiamasis standumas, N/m²; m_s – konstrukcijos masė, kg/m².

Konstrukcijos garso izoliacija iki šio dažnio ($f < f_p$) apskaičiuojama pagal (1.9) formulę:

$$R \cong 20 \log(f m_s) - K_R + 40 \log \left(\frac{f_p}{f} \right). \quad (1.9)$$

Principinis garso izoliacijos grafikas visoje dažnių juostoje pateiktas 1.18 pav.

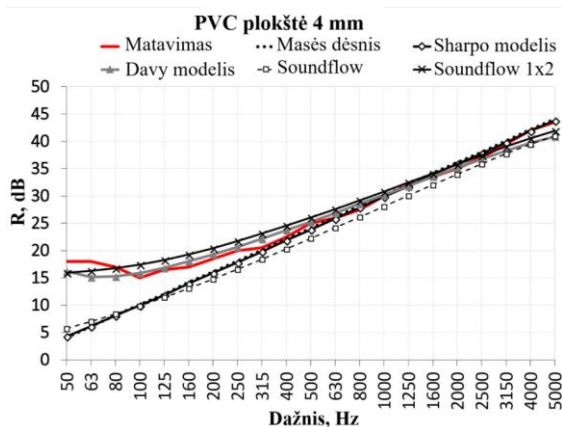


1.18 pav. Principinis viengubos konstrukcijos garso izoliacijos grafikas per visą dažnių juostą (Long, 2014)

Fig. 1.18. Principle graph of sound insulation of a single-layer structure over the entire frequency band (Long, 2014)

Grafikas aiškiai rodo, kad yra trys pagrindiniai dažniai, rezonansinis f_p , kritinis f_c ir kampinės deformacijos dažnis f_s . Viengubų konstrukcijų garso izoliacija gerėja didėjant dažniui, o jų garso izoliacija daugiausia priklauso nuo pačios konstrukcijos masės.

Viengubų konstrukcijų teoriniai tyrimai analizuojami lyginant juos su eksperimentinių tyrimų ir skaitinio modeliavimo rezultatais. Šių dėsnių pritaikymą analizavo ir mokslininkas Kosala, kuris lygino PVC ir kitų viengubų medžiagų rezultatus, gautus eksperimentinių ir skaitinio modeliavimo tyrimų metu su Davy ir Sharp modeliais. Iš gautų rezultatų 1.19 pav. matoma, jog garso izoliacijos rodikliai yra labai artimi.



1.19 pav. Garso izoliacijos rodiklio R rezultatų palyginimas (Kosala, 2019a)

Fig. 1.19. Comparison of sound insulation index R results (Kosala, 2019a)

Mokslininkas daro išvadą, jog šie metodai yra gana tikslūs ir patikimi viengubų medžiagų garso izoliacijai teoriškai apskaičiuoti.

Dvigubų konstrukcijų teorinis skaičiavimas yra kur kas sudėtingesnis. Dvigubų konstrukcijų negalima imti kaip bendros konstrukcijos. Dvi plokštės dažniausiai yra atskirtos mediniu, metaliniu ar kitokiu karkasu, dėl to reikia atsižvelgti į karkasu sklindančias vibracijas, kurios sukelia garso izoliacijos sumažėjimą esant tam tikriems dažniams. Dvigubos konstrukcijos garso perdavimo sumažėjimas grindžiamas teorija, kuri pirmiausia vertina konstrukciją, kurios plokštės nėra struktūriškai susietos, o vėliau skaičiuojama įvairių jungčių įtaka garso izoliacijai. Tarp konstrukcijų esantis oro tarpas veikia kaip spyruoklė, todėl susidaro masės–oro–masės rezonansas, aprašomas (1.10) formule:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3,6\rho_0 c_0^2}{m'd}}, \quad (1.10)$$

čia $m' = (2m_1 m_2)/(m_1 + m_2)$, kg/m^2 ; d – tarpas tarp plokščių, m.

Garso izoliacijos iki šio dažnio apskaičiuojama pagal (1.11) formulę:

$$R \cong 20 \log(fM) - K_R \quad f < f_0, \quad (1.11)$$

čia M – bendra visos konstrukcijos masė, kg/m^2 ; f – dažnis, Hz.

Garso izoliacija už masės–oro–masės rezonanso skaičiuojama pagal (1.12) formulę. Šie skaičiavimai tinkami iki dažnio f_l , kuriame garso bangos ilgis susilygina su tarpu tarp dviejų konstrukcijos plokščių.

$$R \cong R_1 + R_2 + 20 \log(2kd) \quad f_0 < f < f_l, \quad (1.12)$$

čia R_1 ir R_2 – konstrukcijos plokščių garso izoliacija pagal masės dėsnį; d – tarpas tarp konstrukcijos plokščių, m; k – bangos skaičius, apskaičiuojamas pagal (1.13) formulę:

$$k = \frac{2\pi f}{c_0}. \quad (1.13)$$

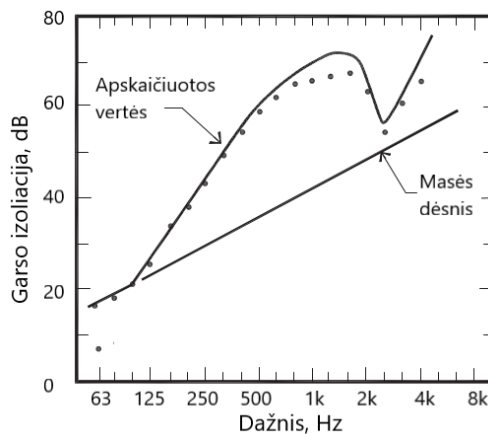
Dažnis f_l , kuriame garso bangos ilgis tampa lygus tarpui tarp konstrukcijos plokščių, apskaičiuojamas pagal (1.14) formulę:

$$f_l = \frac{c_0}{2\pi d} = \frac{f_1}{\pi}. \quad (1.14)$$

Garso izoliacija, esant šioms dažniams, apskaičiuojama pagal (1.15) formulę:

$$R \cong R_1 + R_2 + 6 \quad f_l < f. \quad (1.15)$$

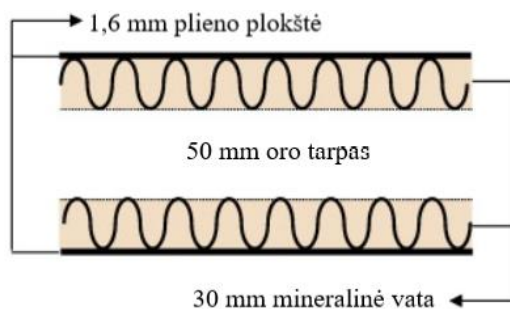
Tipinis garso izoliacijos grafikas esant dvigubai konstrukcijai pateiktas 1.20 pav.



1.20 pav. Teoriškai apskaičiuotos garso izoliacijos rodiklis R , įtraukiant rezonanso sritį (Long, 2014)

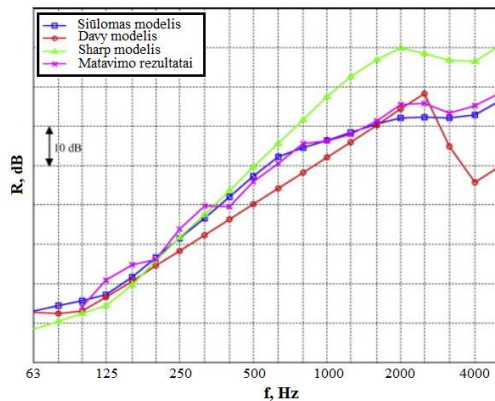
Fig. 1.20. Theoretically calculated sound insulation index R , including the resonance region (Long, 2014)

Dvigubų konstrukcijų teorinių tyrimų palyginimas su eksperimentiniais ir skaitinio modeliavimo rezultatais taip pat yra gana dažnai mokslininkų analizuojama tema. Šiais dėsniais pagrįsti Sharpo ir Davy modeliai, kurie, anot mokslininkų, yra gana tikslūs ir patikimi dvigubų konstrukcijų garso izoliacijai analizuoti. Mokslininkas Hwang savo darbe analizavo šių teorinių modelių pritaikymą dvigubų konstrukcijų garso izoliacijai skaičiuoti. Savo darbe jis tyrinėjo dvigubas konstrukcijas, sudarytas iš dviejų metalinių plokščių, pripildytų mineraline vata, atskirtų oro tarpu. Analizuojant konstrukciją su 50 mm oro tarpu (1.21 pav.) buvo gauti rezultatai, pateikti 1.22 pav.



1.21 pav. Dviguba garšą izoliuojanti konstrukcija (Hwang et al., 2015)

Fig. 1.21. Double sound insulation construction (Hwang et al., 2015)



1.22 pav. Teorinių skaičiavimo ir atliktų matavimo rezultatų palyginimas (Hwang et al., 2015)

Fig. 1.22. Comparison of theoretical calculation and measurement results (Hwang et al., 2015)

Pasak mokslininko, gauti rezultatai tiksliai nurodo masės–oro–masės rezonansą, taip pat kritinius dažnius. Rezultatai yra gana artimi esant žemesiems ir vidutiniams dažniams, esant aukštiesiems dažniams rezultatai išsiskiria. Išvados teigiama, jog modeliai yra gana patikimi ir tinkami naudoti, tačiau tai labai priklauso nuo konstrukcijų sandaros (Hwang et al., 2015).

Skaičiuojant dvigubas konstrukcijas taip pat būtina įvertinti karkaso daromą įtaką konstrukcijos garso izoliacijai. Prie karkaso prijungus konstrukcijos plokštes, susidaro akustiniai tiltai, kurias perduodama energija. Tokie tiltai gali būti taškiniai arba linijiniai, todėl juos privalu įvertinti tiriant dvigubas konstrukcijas. Taškiniams sujungimams garso izoliacija skaičiuojama remiantis (1.16) formule:

$$R_{BP} = 20 \log(e f_c) + 20 \log\left(\frac{m_1}{m_1 + m_2}\right) - K_{BP} . \quad (1.16)$$

Linijiniams sujungimams taikoma (1.17) formulė:

$$R_{BL} = 20 \log(b f_c) + 20 \log\left(\frac{m_1}{m_1 + m_2}\right) - K_{BL} , \quad (1.17)$$

čia e – tarpai tarp taškų, m; b – tarpai tarp linijinių jungčių, m; m_1 – konstrukcijos masė, kg/m²; m_2 – plokštės masė, kurią laiko taškinės arba linijinės jungtys, kg/m²; f_c – plokštės, kuri laikoma ant linijinės arba taškinės jungties, kritinis dažnis, Hz; K_{BP} – taškinių jungčių konstanta, $K_{BP} = -44,7$; K_{BL} – linijinių jungčių konstanta, $K_{BL} = -22,8$.

Jungties dažnis, esant taškinių jungtims, apskaičiuojamas pagal (1.18) formulę:

$$f_{BP} = f_0 \left(\frac{e}{\lambda_c} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1.18)$$

Jungties dažnis, esant linijinėms jungtims, apskaičiuojamas pagal (1.19) formulę:

$$f_{BL} = f_0 \left(\frac{\pi b}{8\lambda_c} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (1.19)$$

Bendra garso izoliacija dviguboms konstrukcijoms su jungtimis apskaičiuojama pagal (1.20) lygčių sistemą:

$$R \cong \begin{cases} 20 \log(Mf) - K_R & f < f_0 \\ R_1 + R_2 + 20 \log(2kd) & f_0 < f < f_B \\ 20 \log(Mf) - K_R + R_B & f_B < f < 0,5f_c \end{cases}. \quad (1.20)$$

Lyginant teorinius ir laboratorinius skaičiavimus, dažniausiai gaunami šiek tiek geresni rezultatai. Geresnis rezultatas gaunamas skaičiuojant konstrukcijas, sujungtas linijinėmis jungtimis.

1.5. Garso izoliavimo modeliavimo programų apžvalga

Teoriniai modeliai dažnai praleidžia tam tikrus fizinius reiškinius ir lemia santykinai mažą garso izoliacijos prognozavimo tikslumą ir gali būti pritaikomi tik tam tikrų tipų atitvaroms, pvz., atitvaroms su tuščiomis ertmėmis. Skaitmeniniai modeliai gali užtikrinti geresnį tikslumą dėl savo skaičiavimo galimybių. Dešimtame dešimtmetyje kompiuteriai leido apdoroti didesnius kiekius duomenų, todėl atsirado galimybė spręsti sudėtingesnius uždavinius, o tai leido modeliuoti ribinius elementus. Kadangi šie modeliai buvo brangūs, kai kurie iš jų yra supaprastinami. Priimant pusiau begalines erdves patalpoms ir neįvertinant jungčių, skaičiavimo sąnaudos gali būti sumažintos. Šie supaprastinti modeliai geriausiai veikia esant žemiesiems dažniams, nes žemojo dažnio garso izoliaciją lemia garso perdavimas per tuštumas tarp konstrukcijos plokščių. Modelių trūkumas tas, jog, norint apskaičiuoti garso izoliaciją esant aukštiesiems dažniams, reikalingas smulkus tinklėlis ir daugiau parametrų.

Atalla, Panneton, Sgard modeliavo žemojo dažnio garso izoliaciją, pagrįstą įvairių atitvaros sluoksnių baigtinių elementų formavimu, sujungtu su ribinio elemento metodu, kad būtų galima atsižvelgti į oro slėgį (Panneton & Atalla, 1996; Sgard et al., 2000). Šie modeliai buvo išplėsti taip, kad plokštės būtų standžiai sujungtos karkasu. Modelyje tiek karkaso, tiek plokštės poslinkiai buvo sujungti naudojant struktūrinio suvaržymo lygtis. Davidsson ir Brunskog į savo

baigtinių elementų modeli įtraukė metalo jungtis, kad būtų galima modeliuoti garso izoliaciją esant aukštesiems dažniams, kur konstrukcijomis sklindantis garsas privalo būti įtrauktas į skaičiavimus (Brunskog & Davidsson, 2004; Davidsson et al., 2004). Modelis buvo naudojamas tik iki 630 Hz dažnio, tačiau Arjunan jį pratęsė iki 3150 Hz. Siekiant sumažinti skaičiavimo sąnaudas, garso izoliacija vertinama 1/3 oktavoje (Arjunan et al., 2013, 2014).

Šiais laikais naudojamos pažangios modeliavimo programos, kurios geba greitai apdoroti duomenis ir pateikti konstrukcijų garso izoliacijos rezultatus. Vienos iš pagrindinių programų yra INSUL, „WinFlag“, „Bastian“, „Soundflow“.

INSUL programa skirta modeliuoti sienų, grindų, stogo, lubų ir langų garso izoliacijoms, taip pat smūginiam ir lietaus triukšmui grindims ir stogui. Programa gali atlikti tikslius smūginio garso (L_n), garso izoliavimo rodiklio (R_w) skaičiavimus trečdaliai oktavos juostoje. Programa gali greitai apskaičiuoti naujų medžiagų ir sistemų rodiklius arba parodyti, kaip pakistų garso sugertis patalpose, pakeitus medžiagas. INSUL tinka greitam naujų medžiagų ir sistemų įvertinimui. Programa naudoja įvairių medžiagų ir sienelių vidinę duomenų bazę. Sudėtingesnės pertvaros sukurtos remiantis Sharpo, Davy, Cremerio (Cremer et al., 2005; Davy, 2009, 2010b; Sharp, 2007) ir kitų mokslininkų darbais. Programa geba skaičiuoti viengubas (iki 6 sluoksnių), dvigubas ir trigubas konstrukcijas. Į skaičiavimus įtraukiamos jungtys tarp konstrukcijų. Duomenų analizė sparti, duomenys pateikiami lentelėse, o modeliuojama konstrukcija vaizduojama tiek dvimatėje, tiek trimatėje plokštumoje. Tačiau programa neskaičiuoja jungčių tarp konstrukcijų, į elementų garso izoliacijos skaičiavimus neįtraukia ventiliacijos angų, durų ir langų.

Šioje programoje yra gana didelė duomenų bazė, kuri gali būti papildyta kitų mokslininkų tyrimais, rezultatus gali laisvai pateikti laboratorijos, atlikusios medžiagų garso izoliacijos rodiklių tyrimus.

„WinFlag“ programa skaičiuoja konstrukcijų, skirtingai sukombinuotų su skirtingais medžiagų sluoksniais, absorbcijos koeficientus ir garso izoliacijos rodiklius. Programa gali būti skaičiuojamos konstrukcijos, sudarytos iš poringųjų medžiagų (mineralinės vatos), kietų ir perforuotų plokščių (su apvaliomis skylėmis, mikroperforuotų ir kt.). Taip pat programa gali skaičiuoti triukšmo slopinimą vėdinimo angose, leidžia apskaičiuoti 19-os skirtingų sluoksnių absorbcijos koeficientus, įtraukiant keturis skirtingus poringosios medžiagos sluoksnius. Gali būti apskaičiuoti kiekvienos konstrukcijos derinio, sudaryto iš ne daugiau kaip 20 sluoksnių, absorbcijos koeficientai. Paskutinis dvidešimtas sluoksnis yra kietas paviršius. Tačiau į modeliavimą nėra įtraukti jungčių skaičiavimai, todėl programa skaičiuoja tik viengubas konstrukcijas, todėl nėra galimybės sumodeliuoti dvigubų konstrukcijų su jungtimis.

Rezultatai pateikiami trečdaliai oktavos dažnių juostoje. Visi rezultatai toliau apdoroti gali būti perkelti į „Microsoft Excel“ failą.

„DataKustic Bastian“ programa modeliuoja orinio garso izoliaciją tarp kambarių, perdangų smūgio garsą tarp patalpų, orinio triukšmo garsą iš aplinkos bei aidėjimo trukmę patalpose, remiantis standartu EN 12354:2017. Programa į skaičiavimus įtraukia visus elementus, per kuriuos sklinda garsas patalpose. „Bastian“ programa suteikia galimybę į modeliavimą įtraukti:

- daug skirtingų elementų jungčių;
- į modeliuojamą konstrukciją įterpti duris ar langus;
- galima pridėti papildomus elementus, tokius kaip ventiliacijos ortakius, angas, kabelių kanalus ir t. t.

Modeliuojamos konstrukcijos pateikiamos trimatėje erdvėje, o rezultatai – lentelėse ir grafikuose.

Programa yra tinkama pastatų akustikai modeliuoti. Ja galima modeliuoti įvairias situacijas, numatyti garso lygius patalpose, apskaičiuoti elementų garso izoliacijos rodiklius. Programa modeliuoja bendrą patalpų akustiką, o sumodeliuoti atskirus elementus yra sudėtingiau, dėl to programos rezultatus yra sunkiau palyginti su laboratoriniais tyrimais.

Programa „AFMG SoundFlow“ skirta skaičiuoti viengubų konstrukcijų, sudarytų iš kelių sluoksnių, absorbcijai, atspindžiui ir garso perdavimui per konstrukciją. Programa gali skaičiuoti sienų, grindų ir lubų konstrukcijas, sudarytas skirtingo storio medžiagų.

Programa skaičiuotų konstrukcijų rezultatai yra lengvai suderinami su interferometru gautais rezultatais. Tačiau ši programa neskaičiuoja jungčių tarp dvigubų konstrukcijų, todėl ji negali būti panaudota dviguboms ir dviguboms konstrukcijoms modeliuoti.

1.1 lentelė. Modeliavimo programų palyginimas

Table 1.1. Comparison of simulation programs

Programa	Teigiama	Neigiama
„WinFlag“	Modeliuoja viengubas konstrukcijas, sudarytas iki 19 sluoksnių. Skaičiuoja poringąsias, kietas ir perforotas medžiagas.	Neskaičiuoja jungčių tarp konstrukcijos plokščių, todėl netinkama dvigubų ir trigubų konstrukcijų garso izoliacijai modeliui.
INSUL	Skaičiuoja viengubas, dvigubas ir trigubas konstrukcijas. Į skaičiavimus įtraukia jungtis tarp konstrukcijos plokščių. Interaktyvi aplinka. Didelė duomenų bazė.	Neskaičiuoja jungčių tarp skirtingų elementų. Į skaičiavimus neįtraukia durų, langų, ventiliacijos angų ir kt.

1.1 lentelės pabaiga

Programa	Teigiama	Neigiama
„DataKustik Bastian“	Modeliuoja pastatų akustiką. Interaktyvi aplinka. Didelė duomenų bazė. Į skaičiavimus įtraukia jungtis tarp elementų, taip pat ventiliacijos angas, langus, duris.	Sunkiau suderinama su rezultatais, gautais laboratorinių tyrimų metu.
„AFMG SoundFlow“	Modeliuoja viengubas konstrukcijas. Skaičiuoja konstrukcijų absorbciją, atspindį ir garso perdavimą per konstrukciją. Rezultatai susiejami su interferometro rezultatais.	Neskaiciuoja dvigubų ir trigubų konstrukcijų. Į skaičiavimus neįtraukia jungčių tarp konstrukcijos plokščių.

Lyginant visas programas, galima nustatyti kiekvienos programos pranašumus ir trūkumus. Kadangi darbe akcentuojamas atitvarų garso izoliacijos modeliavimas, jungčių skaičiavimas, rezultatų palyginamas su eksperimentiniais tyrimais laboratorijoje, tinkamiausia yra programa INSUL, kuri geba skaičiuoti ne tik viengubas, bet ir dvigubas bei trigubas konstrukcijas.

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Gumos atliekos dažniausiai naudojamos betono mišiniuose, jomis pakeičiant gamtinius resursus – žvyrą, smėlį. Mokslinėje literatūroje rašoma, kad gumos granuliu naudojimas mažina konstrukcijų atsparumą gniuždymui, tačiau didina atsparumą lenkimui, todėl tokios konstrukcijos tinkamos perdangoms. Naudojant betono mišiniuose iki 25 % gumos granuliu, pasiekiamos geros medžiagų absorbcinės savybės dėl padidėjusio poringumo ir orinės varžos, absorbcija siekia iki 0,4 esant 2400 Hz dažniui. Įrodyta, jog betonas su gumos granulėmis geriau izoluoja garsą negu grynas betonas, garsas izoliuojamas iki 30 dB esant 2000 Hz dažniui.
2. Gumos devulkanizacijos proceso metu nutraukiamos kryžminės jungtys tarp S–S (sieros–sieros) ir C–S (anglis–siera), siekiant nepažeisti pagrindinės grandinės C–C. Visų devulkanizacijos procesų

metu turi būti kontroliuojama energija, reikalinga kryžminėms jungtims nutraukti. Teoriškai įmanoma nutraukti kryžmines jungtis nepažeidžiant pagrindinės polimerų grandinės, nes joms nutraukti reikalingas šiek tiek mažesnis energijos kiekis: C–C – 348 kJ/mol, C–S – 273 kJ/mol, S–S <227 kJ/mol. Pagrindiniai devulkanizacijos metodai – pirminis smulkinimas, cheminė, ultragarsinė, mikrobangų, biologinė, termomechaninė, devulkanizacija superkritiniame CO₂.

3. Atlikus kelių sluoksnių konstrukcijų tyrimų literatūros analizę, buvo nustatyta, jog, keičiant gumos storį konstrukcijoje, galima keisti jos rezonansinį dažnį. Analizė parodė, jog tokios konstrukcijos pasižymi aukštais garso izoliacijos rodikliais aukštųjų dažnių diapazone (>1000 Hz), tačiau esant žemesiems dažniams jų efektyvumas yra žemas, todėl, norint pagerinti jų efektyvumą esant žemesiems dažniams, yra kuriamos korėtos konstrukcijos arba metamedžiagos. Taip pat nustatyta, jog medžiagų garso sugerties vertės nekoreliuoja su garso perdavimo koeficientu kelių sluoksnių konstrukcijose. Vieni iš populiariausių tokių konstrukcijų teorinių modelių – perdavimo matricos metodas, kuris priklausomai nuo medžiagų charakteristikų gali būti koreguojamas atsižvelgiant į šlyties deformacijas.
4. Remiantis mokslininkų tyrimais nustatyta, jog viengubų ir dvigubų konstrukcijų garso izoliacija priklauso nuo jų masės, medžiagų deformacinių savybių, konstrukcijos plokščių jungčių matmenų ir tipo. Vien didinant konstrukcijos masę 50 %, garso izoliacija esant aukštiesiems dažniams gali pagerėti iki 30 %. Atliekant konstrukcijų teorinius tyrimus labai svarbūs yra specifiniai dažniai, kuriems esant susidaro rezonansai. Rezonansinis dažnis esant žemesiems dažniams priklauso nuo konstrukcijos standumo, esant aukštiesiems dažniams – nuo konstrukcijos storio. Dvigubose konstrukcijose dėl atsirandančių jungčių tarp konstrukcijos plokščių atsiranda masės–oro–masės rezonansas. Remiantis teoriniais modeliais, dvigubai padidinus oro tarpą tarp dviejų plokščių, rezonansinis dažnis pasislenka į 30 % žemesnį dažnį.
5. Išanalizuotos keturios skaitinio modeliavimo programos: INSUL, „WinFlag“, „Bastian“ ir „AFMG Soundflow“. Visos programos skaičiuoja garso izoliaciją remdamosi standartu ISO 12354. Programa „WinFlag“ ir „AFMG SoundFlow“ neskaičiuoja dvigubų konstrukcijų. Programa „DataKustik Bastian“ daugiau skirta garso izoliacijai tarp patalpų modeliuoti. Disertacijoje atliekamiems tyrimams analizuoti tinkamiausia programa yra INSUL, nes ji skaičiuoja ne tik viengubas konstrukcijas, bet ir dvigubas bei trigubas, tai pat turi didelę duomenų bazę, aiškų darbo langą.

6. Atlikus mokslinės literatūros analizę buvo nustatyta, kad gumos granulių plokščių naudojimas garsą izoliuojančiose konstrukcijos yra mažai ištirtas ir daugiau dėmesio skiriama kitiems gumos granulių naudojimo būdams.
7. Naudojant tris skirtingas gumos granulių frakcijas, kurių dvi gautos pirminio apdorojimo būdu smulkinant mechanškai, trečią – cheminės devulkanizacijos būdu granules surišant poliuretaniniais klijais, sukurti gumos granulių plokštės, granulių frakcijų santykį keičiant kas 25 % ir atlikti orinės varžos, tankio ir dinaminio standumo tyrimus bei garso sugerties eksperimentinius tyrimus interferometru.
8. Atlikti konstrukcijų su perdirbtų padangų gumos granulių plokštėmis eksperimentinius garso perdavimo sumažėjimo tyrimus interferometru ir įneštinio silpninimo tyrimus beaidėje kameroje, analizuojant konstrukcijų garso izoliacijos vertes ir rezonansinius dažnius.
9. Atlikti kelių sluoksnių konstrukcijų su gumos granulių ir gipso kartono plokštėmis teorinį modeliavimą taikant perdavimo matricos metodą.
10. Remiantis atliktais eksperimentiniais rezultatais sukurti garsą izoliuojančią konstrukciją, skirtą įrenginių triukšmui mažinti ir konstrukcijos modeliavimui atlikti naudojant „Odeon“ programinę įrangą.

Konstrukcijų su gumos granulių plokštėmis fizikinių ir akustinių savybių eksperimentinių tyrimų ir garsą izoliuojančio gaubto skaitinio modeliavimo metodikos

Šiame skyriuje aprašomos eksperimentinių tyrimų, garso izoliacijos eksperimentinių, teorinių ir skaitinio modeliavimo metodikos, pagrindinės formulės, įvesties duomenys.

Gumos granulių plokščių sandara yra granuluota, dėl to tokia medžiaga gali būti naudojama kaip garsą sugerianti medžiaga. Taip pat yra žinoma, jog guma gerai slopina vibracijas, yra didelio tankio medžiaga, todėl ji gali būti naudojama kelių sluoksnių konstrukcijoms, izoliuojančioms triukšmą, kurti. Tačiau šiuo metu atlikta mažai tyrimų, skirtų gumos granulių akustinių savybių ištirti.

Tyrimų tikslas – sukurti skirtingus gumos granulių mėginius, naudojant trijų skirtingų gumos granulių frakcijas, jas surišant poliuretaniniais klijais, atlikti mėginių garso sugerties, garso perdavimo sumažėjimo, įneštinio silpninimo tyrimus, papildomai analizuojant, kaip keičiasi rezultatai priklausomai nuo medžiagos granulimetrinės sudėties ir jos fizinių savybių. Remiantis atliktais

tyrimais suprojektuoti ir sumodeliuoti garsą izoliuojantį gaubtą įrenginių triukšmui mažinti.

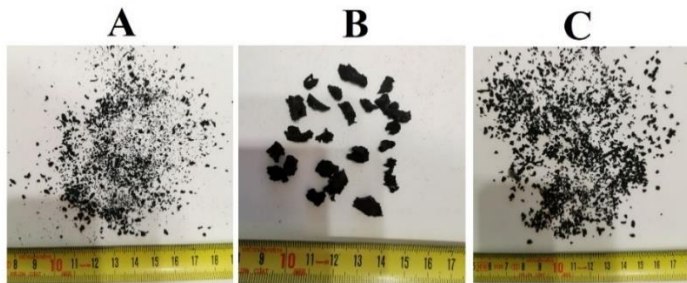
Skyriaus tematika išspausdinti penki moksliniai straipsniai (Vilniškis & Januševičius, 2023a, 2023b, 2024a, 2024b; Vilniškis et al., 2020).

2.1. Gumos granulių plokščių paruošimo metodika ir jų fizinių savybių tyrimai

Kuriant garsą izoliuojančias ir sugeriančias konstrukcijas buvo pagamintos gumos granulių plokštės. Eksperimentinių tyrimų metu svarbu išsiaiškinti, kaip kinta gumos granulių plokščių fizinės savybės (tankis, dinaminis standumas, orinė varža) naudojant skirtingas gumos frakcijas. Atsižvelgiant į skirtingų plokščių fizines savybes, analizuojama garso sugerties ir garso perdavimo sumažėjimo priklausomybė nuo gumos granulių plokštės sudėties.

Gumos granulių plokštės buvo gaminamos naudojant trijų skirtingų frakcijų gumos granules (2.1 pav.):

- A – smulkiosios frakcijos gumos granulės;
- B – stambiosios frakcijos gumos granulės;
- C – chemiškai devulkanizuotos gumos granulės.



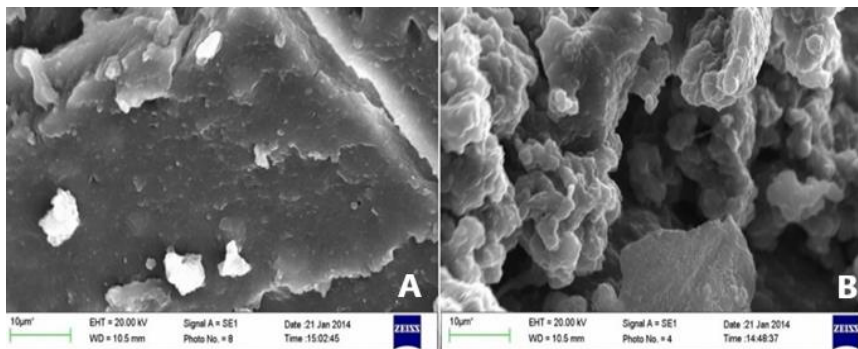
2.1 pav. Gumos granules; A – smulkioji frakcija; B – stambioji frakcija;
C – chemiškai devulkanizuotos granulės

Fig. 2.1. Rubber granules: A – small fraction; B – large fraction;
C – chemically devulcanized granules

Smulkiosios ir stambiosios gumos granulės frakcijos, kaip dvi atskiros frakcijos, buvo pasirinktos siekiant išsiaiškinti, kaip viena ir kita frakcija lemia gumos granulių plokščių garso izoliacijos ir sugerties savybes, nes smulkiosios frakcijos gumos granulėms pagaminti reikalingi specifiniai įrenginiai ir smulkinimo procesas užtrunka kur kas ilgiau, lyginant su stambiosios frakcijos gumos granulėmis. Chemiškai devulkanizuotos gumos granulės pasirinktos todėl,

jog devulkanizuojamų granulių poringumas didėja, todėl ir tokių plokščių akustinės savybės turėtų būti didesnės.

Chemiškai devulkanizuojant gumos granules, buvo gautos didesnio poringumo ir iš dalies plaušinės struktūros gumos granulės. Skirtumas tarp vulkanizuotos ir devulkanizuotos gumos granulių pateiktas 2.2 pav. Struktūros tyrimams naudotas skenuojantysis elektroninis mikroskopas (SEM) „Zeiss“.



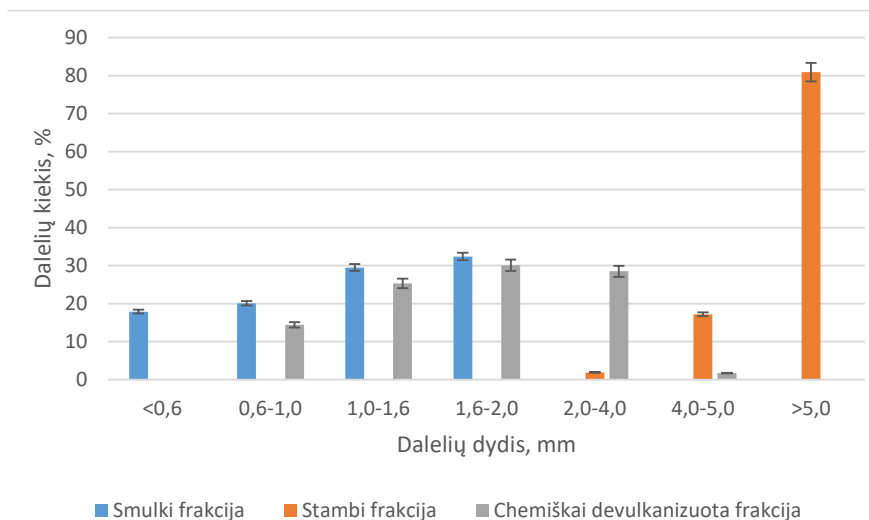
2.2 pav. A – mechaniniu būdu nuimta guma; B – cheminiu būdu devulkanizuota guma
Fig. 2.2. A – mechanically removed rubber; B – chemically devulcanized rubber

Devulkanizuojant gumą cheminiu būdu, paverčiant į devulkanizuotos gumos miltus, mechaninė šlytis sukelia įtempius –S–S– tilteliuose tarp kaučiuko grandinių. Devulkanizavimo agento junginiai skatina –S–S– tiltelių delokalizaciją, todėl gumos dalelių sukibimas slopinamas ir gaunamos gumos granulės, kurių paviršiaus poringumas didesnis. Lyginant vulkanizuotas ir devulkanizuotas gumos granules galima pastebėti, jog po devulkanizacijos proceso gumos granulių paviršius tampa glotnesnis, o vulkanizuotos gumos paviršius yra aštresnis ir lygesnis. Taip pat padidėja granulių poringumas, atsiranda tarpai tarp gumos dalelių (5–10 µm). Padidėjęs gumos granulių poringumas leidžia garso bangoms lengviau patekti į medžiagą. Garso energiją išsklaido šiluminiai nuostoliai, atsirandantys dėl oro molekulių trinties su porų sienelėmis. Taip pat dėl vidinės trinties atsiranda klampumo nuostoliai, kai dėl gretimų judančių sluoksnių judesio impulsas perduodamas iš lėtesnių sluoksnių į greitesnius. Šie energijos nuostoliai suteikia poringoms medžiagoms garso sugertį plačiu dažnių diapazonu.

Granuliometrinė skirtingų gumos granulių sudėtis buvo nustatoma sauso sijojimo metodu. Sijoti buvo naudojami 0,6 mm, 1 mm, 1,6 mm, 2 mm, 4 mm ir 5 mm sietai. Sijojant ant sietų nusėdusios granulės buvo pasveriamos. Persijotų dalelių svoris procentais apskaičiuojamas pagal (2.1) formulę:

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

čia m_n – per sieta persijotų gumos granulių masė, kg; m_d – bendra gumos granulių masė, kg.



2.3 pav. Gumos granulių granulimetrinė sudėtis
Fig. 2.3. Granulometric composition of rubber granules

Atlikus gumos granulių granulimetrinės sudėties analizę (2.3 pav.) nustatyta, kad smulkiąją frakciją daugiausia sudaro 1,0–2,0 mm storio gumos frakcija, kurios bendras kiekis sudaro 61,9 %, likusią frakciją sudaro dalelės, kurių dydis <1,0 mm. Didžiąją dalį stambiosios frakcijos sudaro >5,0 mm dydžio dalelės (80,9 %), likusi dalis – 2,0–5,0 mm dydžio (19,1 %). Chemiškai devulkanizuotą frakciją daugiausiai sudaro 1,6–2,0 mm dydžio granulės (30,1 %), 1,0–1,6 mm ir 2,0–4,0 mm dydžio dalelės atitinkamai sudaro 25,3 ir 28,5 %. Likusi dalis – dalelės, kurių dydis 0,6–1,0 mm (14,4 %).

Gumos granulių plokštės buvo gaminamos gumos granules sumaišant su poliuretaniniais klijais. Toks gumos granulių plokščių gamybos metodas yra pranašesnis už plokščių gamybą naudojant termopresą, nes, maišant gumos granules su poliuretaniniais klijais, nereikalingas papildomas energijos kiekis ir gamyba yra paprastesnė.

Gaminant gumos granulių plokštes, poliuretaninės dervos ir kietiklio kiekis visais atvejais buvo vienodas ir sudarė 40 % bendros gumos granulių plokštės masės. Iš viso buvo pagaminta 15 skirtingų gumos granulių plokščių, kurių sandara pateikta 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Gumos granulių plokščių sudėtis

Table 2.1. Composition of rubber granule panels

Nr.	Mėginys	Stambioji frakcija, %	Smulkioji frakcija, %	Chemiškai devulkanizuotos granulės, %
1	(D0S0Ch100)	0	0	100
2	(D0S25Ch75)	0	25	75
3	(D0S50Ch50)	0	50	50
4	(D0S75Ch25)	0	75	25
5	(D0S100Ch0)	0	100	0
6	(D25S25Ch50)	25	25	50
7	(D25S50Ch25)	25	50	25
8	(D25S75Ch0)	25	75	0
9	(D25S0Ch75)	25	0	75
10	(D50S25Ch25)	50	25	25
11	(D50S50Ch0)	50	50	0
12	(D50S0Ch50)	50	0	50
13	(D75S25Ch0)	75	25	0
14	(D75S0Ch25)	75	0	25
15	(D100S0Ch0)	100	0	0

Gumos granulių plokštės buvo ruošiamos bandinių ruošimo patalpoje tokiu eiliškumu:

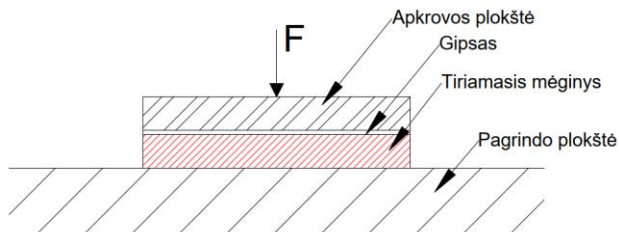
1. Pagal proporcijas padalintos gumos granulės supilamos į atskiras talpyklas. Kiekvienas ruošinys buvo supilamas į maišymo talpyklą ir išmaišomas, kad visos skirtingos granulės tolygiai pasiskirstytų.
2. Į išmaišytą ruošinį supilamas atitinkamas kiekis poliuretalinės dervos ir mėginys dar kartą išmaišomas, kol poliuretalinė derva tolygiai pasiskirsto ruošinyje.
3. Išmaišius gumos granules su poliuretano derva, supilamas kietiklis ir viskas dar kartą išmaišoma, kol kietiklis tolygiai pasiskirsto ruošinyje.
4. Gautas gumos mišinys sudedamas į 15, 25 ir 50 mm storio rėmelius ir paliekamas 24 valandoms sustingti kambario temperatūroje.
5. Sustingus gumos granulių masei, plokštės yra paruoštos tyrimams.

Sustingus gumos granulių mėginiams, buvo atliktas medžiagos tankio tyrimas. Išmatavus kiekvieno mėginio tūrį, mėginys buvo pasveriamas. Gumos mėginio tankis skaičiuojamas remiantis standartu ISO 845:2006 „Akytieji plastikai ir gumos. Tariamąjo tankio nustatymas“.

Pagaminius gumos granulių plokštes, atliekama jų fizinių savybių (tankio, dinaminio standumo ir orinės varžos), garso sugerties ir perdavimo sumažėjimo priklausomybės nuo gumos granulių plokštės sudėties analizė. Analizės metu nustatomos priklausomybės, patikrinant nulinę hipotezę prieš konkuruojančią hipotezę, taip pat apskaičiuojamas determinacijos koeficientas. Nulinė hipotezė $H_0: a = 0$ atmetama ir priimama alternatyvi hipotezė $H_1: a \neq 0$. Jeigu $p < 0,05$, tariama, kad y priklausomumas nuo x yra statistiškai reikšmingas. Jeigu $p \geq 0,05$, y priklausomumas nuo x nėra statistiškai reikšmingas. Statistinė analizė atliekama naudojant „Excel“ programę „Data analysis“.

2.1.1. Gumos granulių plokščių dinaminio standumo nustatymas

Dinaminio standumo tyrimai leidžia įvertinti, kaip tam tikros medžiagos, tokios kaip mineralinė vata, polistirenas, guma geba slopinti vibracijas konstrukcijose. Siekiant užtikrinti, jog tarp dviejų kietų paviršių esanti medžiaga perduotų kuo mažiau struktūrinių vibracijų iš vieno kieto paviršiaus į kitą, medžiagos dinaminis standumas turi būti kuo mažesnis. Dinaminio standumo tyrimai atliekami remiantis standartu ISO 9052-1:1989 „Akustika. Dinaminio standumo nustatymas. 1 dalis. Medžiagos naudojamos plaukiojančioms gyvenamųjų patalpų grindims“. Atliekant tyrimus, tiriamasis mėginys įstatomas tarp dviejų horizontalių paviršių – pagrindo plokštės ir specialios apkrovos plokštės, kurios svoris $8 \pm 0,5$ kg (2.4 pav.). Apkrovos plokštė yra plieninė, jos matmenys 200×200 mm. Pagrindo plokštė turi būti lygi, kieta ir sunki, siekiant užtikrinti, jog, pagrindo plokštėje veikiant vibracijoms, nesusidarytų rezonansų tiriamųjų dažnių diapazone. Rekomenduojamas pagrindo plokštės svoris > 100 kg.



2.4 pav. Dinaminio standumo tyrimo schema

Fig. 2.4. Dynamic stiffness test scheme

Tyrimams naudojamas 200×200 mm dydžio mėginys. Siekiant užtikrinti, jog apkrovos plokštės apkrauna visą mėginį tolygiai, ant mėginio dedama 0,02 mm storio vandeniui nelaidi folijos plėvelė, ant kurio tepamas greitastingio gipso sluoksnis.

Medžiagos dinaminis standumas apibrėžiamas kaip dinaminės jėgos ir dinaminio poslinkio santykis.

2.1.2. Gumos granulių plokščių statinės orinės varžos nustatymas

Orinė varža – vienas pagrindinių parametrų nustatant medžiagos garso sugertį. Orinė varža apibrėžiama kaip statinio dujų slėgio tarp abiejų medžiagos pusių ir oro srauto greičio santykis. Orinė varža storio vienetu atspindi oro pralaidumą per poringas medžiagas. Kuo didesnė orinė varža, tuo mažesnis oro pralaidumas, todėl garso bangos negali patekti į medžiagas, sumažėja garso sugertis. Tačiau, sumažinus oro srauto varžą, transformacijos iš garso energijos iš šiluminę energiją efektyvumas sumažėja. Tad turi būti rasta optimali oro srauto varžos vertė, kad būtų pasiekta geriausia garso sugertis (Liu & Chen, 2014).

Orinei varžai nustatyti taikomas metodas paremtas ISO 9053-1:2018 standartu „Akustika. Orinės varžos nustatymas. 1 dalis. Statinio oro srauto metodas“. Orinei varžai nustatyti buvo naudojamas tyrimo stendas, kurį sudaro vamzdis, kuriuo teka laminarinis oro srautas, oro kompresorius ir mėginio laikiklis. Oro judėjimo greitis ir slėgių skirtumas matuojamas manometru ir oro greičio matuokliu. Siekiant užtikrinti laminarinį oro srautą, stendo vamzdžio ilgis yra 120 cm. Vamzdžio vidinis skersmuo – 30 mm. Bandinio laikiklis yra perforuotas, kurio atviras plotas sudaro 50 %, bandinio laikiklyje sumontuojamas 30 mm skersmens mėginys. Įrenginyje sukuriama oro srautas, kurio greitis turi būti kuo mažesnis, užtikrinant, kad oro srauto greitis neturėtų įtakos slėgiui, susidarantiems prieš medžiagą ir už jos. Principinė orinės varžos matavimo prietaiso schema pateikta 2.5 pav.



2.5 pav. Principinė orinės varžos matavimo prietaiso schema: 1 – oro srautas iš kompresoriaus; 2 – oro tekėjimo vamzdis; 3 – oro greičio matuoklis; 4 – slėgio skirtumo matuoklis; 5 – tiriamasis bandinys

Fig. 2.5. Principle scheme of the air resistance measuring device: 1 – airflow from the compressor; 2 – airflow pipe; 3 – air velocity meter; 4 – pressure difference meter; 5 – test sample

Atliekant orinės varžos matavimus, pirmiausia 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.

Oro pasipriešinimas R skaičiuojamas pagal (2.3) formulę:

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

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

Specifinis oro pasipriešinimas R_S skaičiuojamas pagal (2.4) formulę:

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

čia A – bandinio skerspjūvio plotas, m^2 .

Medžiagos orinė varža σ apskaičiuojama kaip santykis tarp specifinio oro pasipriešinimo R_S ir bandinio storio d :

$$\sigma = \frac{R_S}{d}. \quad (2.5)$$

Atlikus orinės varžos tyrimus, rezultatai lyginami su garso sugerties eksperimentiniais tyrimais, siekiant išsiaiškinti optimalią orinę varžą, su kuria gaunami aukščiausi garso sugerties rezultatai.

2.2. Medžiagų eksperimentinių tyrimų interferometru metodika

Interferometru atliekami medžiagų absorbcijos ir garso perdavimo sumažėjimo per medžiagą tyrimai. Tyrimai atliekami su 30 mm skersmens apvaliais mėginiais, kurie įdedami į interferometrą. Garso sugerties tyrimai atliekami su skirtingo storio (15–25 ir 50 mm) gumos granulių mėginiais.

Garso perdavimo sumažėjimo tyrimai atliekami matuojant skirtingo storio (15–25 ir 50 mm) gumos granulių mėginius, kurie yra tarp dviejų gipso kartono plokščių (GKB ir GKFI). Papildomai atliekami tyrimai gumą pakeičiant mineraline vata arba paliekant tuščią oro tarpą.

2.2.1. Garso sugerties tyrimo metodika

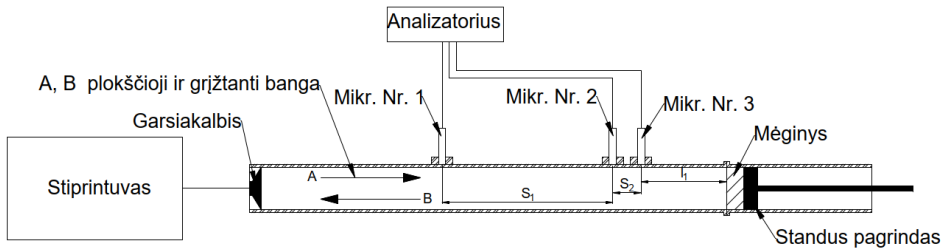
Garso sugerties tyrimai atliekami interferometru (2.6 pav.), remiantis ISO 10534-2:2023 standartu „Akustika. Garso sugerties koeficiento ir pilnutinės varžos nustatymas interferometrais. 2 dalis. Perdavimo funkcijos metodas“. Interferometru atliekami garso sugerties tyrimai 250–5000 Hz dažnių diapazonu.

Atstumai tarp mikrofonų:

$S_1 - 100 \text{ mm};$

$S_2 - 20 \text{ mm};$

$l_1 - 30 \text{ mm}.$



2.6 pav. Garso sugerties tyrimams naudojamas interferometro stendas

Fig. 2.6. Impedance tube measurement set-up used for sound absorption measurements

Prieš pradedant tyrimus, turi būti nustatytas garso greitis c_0 vamzdyje, pagal kurį apskaičiuojamas bangos ilgis λ_0 skirtinguose dažniuose.

Garso greitis vamzdyje apskaičiuojamas naudojantis (2.6) formule:

$$c_0 = 343,2\sqrt{T/293}, m/s, \quad (2.6)$$

čia T – temperatūra, K.

Bangos ilgis apskaičiuojamas pagal (2.7) formulę:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}, m, \quad (2.7)$$

čia f – dažnis, Hz.

Oro tankis apskaičiuojamas pagal (2.8) formulę:

$$\rho = \rho_0 \frac{p_a T_0}{p_0 T}, kg/m^3, \quad (2.8)$$

čia T – temperatūra, K; p_a – atmosferos slėgis, Pa; $T_0 - 293 \text{ K}$; $p_0 - 101,325 \text{ kPa}$; $\rho_0 - 1,186 \text{ kg/m}^3$.

Į vamzdį įdedamas mėginys, vadovaujantis metodikomis, nurodytomis ISO 10534 standarte, ir matuojama kompleksinė akustinė perdavimo funkcija pagal (2.9) formulę:

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} = |H_{12}|e^{j\varphi} = H_r + jH_i, \quad (2.9)$$

čia H_r – realioji dalis H_{12} ; H_i – tariamoji H_{12} dalis.

Atspindžio koeficientas r skaičiuojamas pagal (2.10) formulę:

$$r = |r|e^{j\varphi r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12}-H_I}{H_R-H_{12}} e^{2jk_0x_1}, \quad (2.10)$$

čia r_r – realioji komponentė; r_i – tariamoji komponentė; x_1 – atstumas tarp mėginio ir tolimesnio mikrofono; φ_r – atspindžio koeficiento bangos fazės kampas; H_I – krintančiosios bangos perdavimo funkcija; H_R – atspindėtosios bangos perdavimo funkcija.

H_I ir H_R apskaičiuojamos pagal (2.11) ir (2.12) formules:

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0s}, \quad (2.11)$$

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0s}, \quad (2.12)$$

čia p_1 ir p_2 – garso slėgis dvejose mikrofonų pozicijose.

Garso sugerties koeficientas apskaičiuojamas pagal (2.13) formulę:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2. \quad (2.13)$$

Specifinė akustinė varža apskaičiuojama pagal (2.14) formulę:

$$\frac{Z}{\rho c_0} = \frac{R}{\rho c_0} + \frac{jX}{\rho c_0} = (1 + r)(1 - r), \quad (2.14)$$

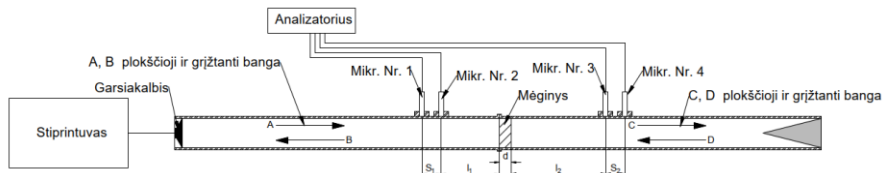
čia R – realioji komponentė; X – tariamoji komponentė; ρc_0 – charakteristinė varža.

Analizuojant rezultatus, garso sugerties koeficiento vertės pateikiamos 250–5000 Hz dažnių diapazone.

2.2.2. Garso perdavimo sumažėjimo tyrimo metodika

Literatūroje publikuota nemažai metodų, skirtų akustinių medžiagų normalinio kritimo kampo plokščiosios garso bangos perdavimo sumažėjimui matuoti (TL). Literatūroje aprašomi du skirtingi metodai, kuriais remiantis interferometru tiriamas garso lygio sumažėjimas. Pirmasis metodas yra perdavimo funkcijos metodas, antrasis remiasi bangų lauko skilimo teorija (Salissou & Panneton, 2009; Tao & Seybert, 2010). Darbe naudojamas perdavimo funkcijos metodas. Dažniausiai nurodyti metodai yra dviejų apkrovų, aprašyti Lung ir Doige (2005), dvigubo šaltinio metodą pasiūlė Munjal ir Doige (1990). Šie metodai dažniausiai vadinami keturių mikrofonų metodu, kai du mikrofonai sumontuoti prieš tiriamąjį objektą, o kiti du mikrofonai – už jo. Pagal dviejų apkrovų metodą viename vamzdžio gale yra garsiakalbis, skleidžiantis garsą, o mikrofonai matuoja garso lygį vienu metu. Pagal dviejų šaltinių metodą garso slėgio matavimai atliekami garsiakalbį sumontuojant viename vamzdžio gale ir pakartojami garsiakalbį pritvirtinus kitame vamzdžio gale. Yra nustatyta, kad teoriškai abu metodai pateikia vienodus rezultatus ir yra gaunami tikslūs akustinio elemento garso lygio

sumažėjimo rezultatai (Salissou & Panneton, 2009). Šiame darbe garso perdavimo sumažėjimo tyrimui bus naudojama keturių mikrofonų sistema, kurios schema pateikta 2.7 pav. Metodika paruošta remiantis standartu ASTM E2611-17:2019 „Standard test method for normal incidence determination of porous material acoustical properties based on the transfer matrix method“.



2.7 pav. Keturių mikrofonų interferometro schema ASTM E2611-17

Fig. 2.7. Scheme of the four microphone impedance tube ASTM E2611-17

Interferometru matavimo diapazonas – 160–5000 Hz. Siekiant išmatuoti visą dažnių diapazoną, naudojamos dvi interferometro konfigūracijos žemųjų dažnių (160–1000 Hz) ir aukštųjų dažnių (1000–5000 Hz) garso perdavimo sumažėjimui tirti. Žemųjų dažnių garso perdavimui sumažėti (160–1000 Hz) atstumai tarp mikrofonų yra didesni.

ų dažnių (160–1000 Hz) garso perdavimo sumažėjimui tirti atstumai tarp mikrofonų yra tokie:

S_1 – 120 mm;

l_1 – 60 mm;

S_2 – 40 mm;

l_2 – 120 mm.

Aukštųjų dažnių (1000–5000 Hz) garso perdavimo sumažėjimui tirti atstumai tarp mikrofonų yra tokie:

S_1 – 20 mm;

l_1 – 60 mm;

S_2 – 40 mm;

l_2 – 20 mm.

Schemoje A, B, C ir D raidėmis pažymėtos plokščiosios ir atspindėtosios bangos. 1, 2, 3 ir 4 pažymėtos matavimo pozicijos, kuriose sumontuoti mikrofonai.

Pradedant tyrimą turi būti nustatytas garso greitis ir oro tankis.

Garso greitis apskaičiuojamas pagal (2.15) formulę:

$$c = 20,047\sqrt{273,15 + t}, \quad (2.15)$$

čia t – kambario temperatūra, °C.

Oro tankis apskaičiuojamas pagal (2.16) formulę:

$$\rho = 1,290 \left(\frac{P}{101,325} \right) \left(\frac{273,15}{273,15+t} \right), \quad (2.16)$$

čia t – kambario temperatūra, °C; P – atmosferos slėgis, Pa;

Plokščiosios ir atspindėtosios bangos skaičiuojamos pagal (2.17)–(2.20) formules:

$$A = j \frac{H_{11}e^{-jkl_1} - H_{21}e^{-jk(l_1+s_1)}}{2\sin ks_1}, \quad (2.17)$$

$$B = j \frac{H_{21}e^{+jk(l_1+s_1)} - H_{11}e^{+jkl_1}}{2\sin ks_1}, \quad (2.18)$$

$$C = j \frac{H_{31}e^{+jk(l_2+s_2)} - H_{41}e^{+jkl_2}}{2\sin ks_2}, \quad (2.19)$$

$$D = j \frac{H_{41}e^{-jkl_2} - H_{31}e^{-jk(l_2+s_2)}}{2\sin ks_2}, \quad (2.20)$$

čia H_{11} , H_{12} ir t. t. – perdavimo funkcijos tarp dviejų mikrofonų; s_1 ir s_2 – atstumai tarp mikrofonų, m; k – bangos skaičius, lygus $2\pi f/c$; f – dažnis, Hz.

Toliau apskaičiuojamas slėgis ir dalelių greitis abiejose mėginio pusėse ($x = 0$ ir $x = d$) pagal (2.21)–(2.24) formules:

$$p_0 = A + B, \quad (2.21)$$

$$u_0 = (A + B)/\rho c, \quad (2.22)$$

$$p_d = Ce^{-jkd} + De^{+jkd}, \quad (2.23)$$

$$u_d = (Ce^{-jkd} - De^{+jkd})/\rho c. \quad (2.24)$$

Toliau yra matrica (2.25 formulė).

$$T = \begin{bmatrix} \frac{p_d u_d + p_0 u_0}{p_0 u_d + p_d u_0} & \frac{p_0^2 - p_d^2}{p_0 u_d + p_d u_0} \\ \frac{u_0^2 - u_d^2}{p_0 u_d + p_d u_0} & \frac{p_d u_d + p_0 u_0}{p_0 u_d + p_d u_0} \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

Garso perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal (2.26) formulę.

$$t = \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + \left(\frac{T_{12}}{\rho c} \right) + \rho c T_{21} + T_{22}}. \quad (2.26)$$

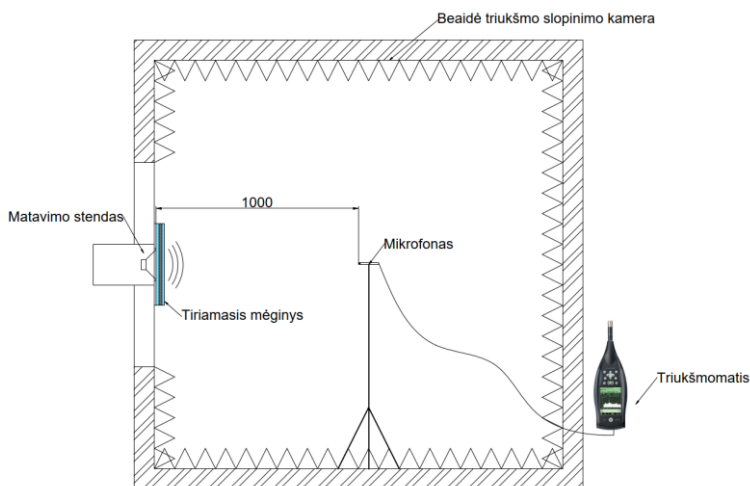
Garso perdavimo sumažėjimas apskaičiuojamas pagal (2.27) formulę:

$$TL = -20 \log \left(\frac{1}{t} \right). \quad (2.27)$$

Garso perdavimo sumažėjimas tinkamai charakterizuoja medžiagos galimybę izoliuoti garsą, specifikuoja medžiagos charakteristikas atsižvelgiant į jos poringumą, gebėjimą atspindėti ir absorbuoti garsą.

2.3. Eksperimentinio garso įneštinio silpninimo tyrimo metodika

Įneštinio silpninimo tyrimai atliekami siekiant išmatuoti medžiagų akustinius parametrus laboratorinėmis sąlygomis, naudojant mažesnio dydžio plokštes. Matuojamo mėginio matmenys – 300×300 mm. Įneštinio silpninimo tyrimai atliekami VILNIUS TECH triukšmo slopinimo kameros beaidėje dalyje. Kameros sienos padengtos akustiniu porolonu, kuris neleidžia patekti pašaliniam garsui į kamerą, kartu sukuria beaidę aplinką (2.8 pav.).



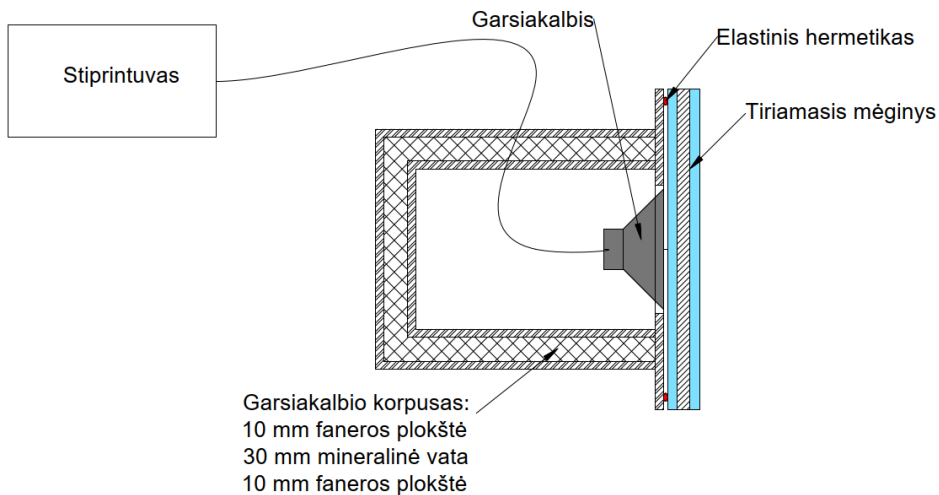
2.8 pav. Įneštinio silpninimo tyrimo schema
Fig. 2.8. Scheme of insertion loss measurements

Įneštinis silpninimas skaičiuojamas kaip skirtumas tarp garso slėgio lygio be papildomos konstrukcijos ir garso slėgio lygio su konstrukcija. Įneštinis silpninimas skaičiuojamas pagal (2.28) formulę:

$$IL = 20 \log \left(\frac{p_{be\ konstr}}{p_{su\ konstr}} \right) = L_{p1} - L_{p2} , \quad (2.28)$$

čia $p_{be\ konstr}$ – garso slėgio lygis be konstrukcijos, dB; $p_{su\ konstr}$ – garso slėgio lygis su konstrukcija, dB.

Tyrimams atlikti buvo sukurtas specialus stendas, kurį sudaro į dėžę sumontuotos dvi garso kolonėlės, skleidžiančios pastovų ir vienodą garsą, kurio dažninė charakteristika visame dažnių spektre yra vienoda (baltasis triukšmas). Prie stendo montuojamos tiriamosios medžiagos. Siekiant užtikrinti sandarumą, mėginys prie stendo montuojamas sandarinant elastiniu hermetiku (2.9 pav.).



2.9 pav. Garso įnešinio silpninimo matavimo stendo principinė schema su pritvirtintomis tiriamosiomis medžiagomis

Fig. 2.9. Sound insertion loss measurement set-up with attached test materials

Atliekant tyrimus pirmiausia išmatuojamas garso slėgio lygis nesumontavus jokios medžiagos L_{p1} , vėliau tyrimai pakartojami su tiriamu mėginiu L_{p2} . Rezultatai apskaičiuojami pagal (2.24) formulę.

Atliekant tyrimus laikomasis šių sąlygų:

- atstumas tarp šaltinio ir mikrofono – 1 m;
- matavimo trukmė – 30 s;
- tyrimams naudojamas baltasis triukšmas.

Šis metodas leidžia patikrinti mažesnio ploto mėginius, nustatyti jų efektyvumą, lyginant su panašiomis medžiagomis. Tyrimų rezultatai papildomai lyginami su skaitinio tyrimo rezultatais INSUL programa, siekiant nustatyti didesnio skersmens plokščių rezonansinius dažnius.

2.4. Konstrukcijų garso izoliacijos rodiklių teorinių tyrimų metodika

Teoriniai garso izoliacijos rodiklių skaičiavimai atliekami perdavimo matricos funkcijos metodu, kuris remiasi medžiagų akustinėmis savybėmis. Pagrindinis skaičiuojamasis parametras – medžiagų akustinė varža, kuri išmatuojama interferometru arba apskaičiuojama atsižvelgiant į medžiagos oro pralaidumą.

Teoriniai tyrimai leidžia įvertinti, kaip kinta konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimas, kuriuose dažniuose nustatomi rezonansiniai dažniai. Remiantis eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatais, bus galima prognozuoti konstrukcijų garso izoliaciją ir jais remiantis sukurti ir sumodeliuoti gautą įrenginių triukšmui mažinti.

Norint sudaryti perdavimo funkciją tiriamajam elementui, svarbu nustatyti sąlygas prieš tiriamąjį elementą ($x = 0$) ir už jo ($x = L$). Pagrindiniai parametrai, aprašantys sąlygas, yra slėgis p ir dalelių greitis v . Per elementą pereinančių ir atgal grįžtančių bangų slėgis parašomas pagal (2.29) ir (2.30) formules:

pereinanti banga:

$$p(x) = P_A e^{-ikx} ; \quad (2.29)$$

grįžtamoji banga:

$$p(x) = P_B e^{ikx} . \quad (2.30)$$

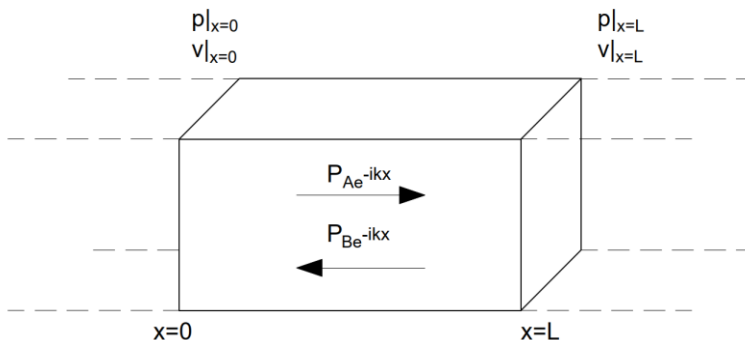
Bendras slėgis elemente aprašomas pagal (2.31) formulę:

$$p(x) = P_A e^{-ikx} + P_B e^{ikx} . \quad (2.31)$$

Bendras dalelių greitis elemente aprašomas pagal (2.32) formulę:

$$v_x(x) = \frac{P_A}{Z} e^{-ikx} - \frac{P_B}{Z} e^{ikx} , \quad (2.32)$$

čia Z – akustinė varža $Z = \rho c$; k – bangos skaičius $k = \omega/c$.



Sąlygos ties $x = 0$ ir $x = L$ aprašomos pagal (2.35)–(2.38) formules:

Kai $x = 0$,

$$p(x)|_{x=0} = P_A + P_B, \quad (2.33)$$

$$Zv_x(x)|_{x=0} = P_A - P_B. \quad (2.34)$$

Kai $x = L$,

$$p(x)|_{x=L} = (P_A + P_B) \cos(kL) - i(P_A - P_B) \sin(kL), \quad (2.35)$$

$$v(x)|_{x=L} = \frac{(P_A - P_B)}{Z} \cos(kL) - i \frac{(P_A - P_B)}{Z} \sin(kL), \quad (2.36)$$

čia L – elemento ilgis, m.

Sujungus abi formules gaunamos šios išraiškos:

$$p(x)|_{x=L} = \cos(kL) p(x)|_{x=0} - iZ \sin(kL) v_x(x)|_{x=0}, \quad (2.37)$$

$$v_x(x)|_{x=L} = \cos(kL) v_x(x)|_{x=0} - i \frac{1}{Z} \sin(kL) p(x)|_{x=0}. \quad (2.38)$$

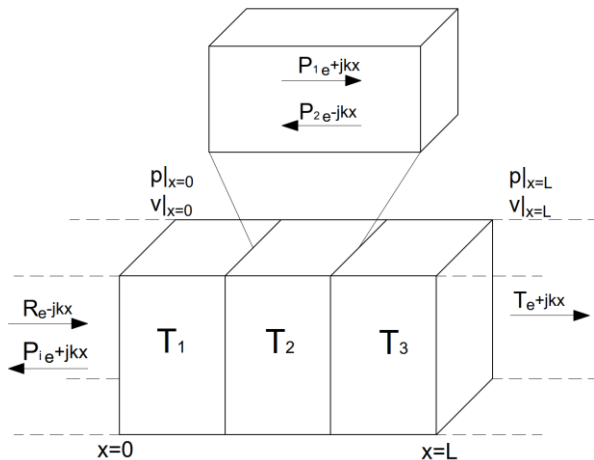
Šios išraiškos gali būti užrašomos tokia matrica:

$$\begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} \cos(kL) & iZ \sin(kL) \\ i \frac{1}{Z} \sin(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=L}. \quad (2.39)$$

Bendrai matrica užrašoma taip:

$$\begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=0} = T \begin{bmatrix} p \\ v_x \end{bmatrix}_{x=L}. \quad (2.40)$$

Kaip matoma paveiksle, kiekvienam elemento sluoksniui gali būti skaičiuojama matrica:



$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos(k_1 L_1) & iZ_1 \sin(k_1 L_1) \\ \frac{i \sin(k_1 L_1)}{Z_1} & \cos(k_1 L_1) \end{bmatrix}. \quad (2.41)$$

$$T_n = \begin{bmatrix} \cos(k_n L_n) & iZ_n \sin(k_n L_n) \\ i \sin(k_n L_n)/Z_n & \cos(k_n L_n) \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

Bendra elemento matrica aprašoma kaip visų elemento dedamųjų matricų sandauga:

$$T = \prod_{n=1}^N T_n, \quad (2.43)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_{eff} L) & iZ_{eff}(k_{eff} L) \\ i \frac{1}{Z_{eff}} \sin(k_{eff} L) & \cos(k_{eff} L) \end{bmatrix}. \quad (2.44)$$

Garso perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal (2.45) formulę:

$$T = \frac{2e^{ikL}}{T_{11} + \frac{T_{12}}{Z_0} + T_{21}Z_0 + T_{22}}. \quad (2.45)$$

Garso perdavimo sumažėjimas apskaičiuojamas pagal (2.46) formulę:

$$TL = -10 \log_{10} |T|^2. \quad (2.46)$$

Teorinių tyrimų rezultatai lyginami su eksperimentiniais garso perdavimo sumažėjimo rezultatais. Atliekant teorinį tyrimą, nustatoma rezonansinio dažnio priklausomybė nuo gumos mėginio storio bei garso perdavimo sumažėjimo vertė.

2.5. Konstrukcijų garso izoliacijos skaitinio modeliavimo metodika

Skaitiniam modeliavimui atlikti naudojama programinė įranga INSUL 9.0. Programa skirta sienų, grindų, stogo, lubų ir langų garso izoliacijoms modeliuoti. Taip pat smūginiam ir lietaus triukšmui grindims ir stogui. Programa gali atlikti garso izoliavimo rodiklio (R_w) skaičiavimus trečdalis oktavos juostoje. Programa gali greitai apskaičiuoti naujų medžiagų ir sistemų rodiklius, pakeitus medžiagas. Programa tinka greitam naujų medžiagų ir sistemų įvertinimui, naudoja įvairių medžiagų ir sienelių vidinę duomenų bazę. Skaičiavimai atliekami remiantis standartu ISO 12354-1:2017.

Skaičiavimai apima keturis skirtingus regionus.

1 regionas. Esant žemesiems dažniams garso perdavimo nuostoliai pirmiausia nustatomi pagal masės dėsnį. Garso izoliacija padidėja 6 dB per oktavą.

2 regionas. Aukščiau masės–oro–masės rezonanso, nustatyto remiantis konstrukcijos mase ir oro tarpu, garso izoliacija didėja 18 dB per oktavą, teigiant, jog abi pusės yra atskirtos.

3 regionas. Kai tarpas tarp dviejų plokščių tampa lygus bangos ilgiui, teigiama, jog ertmėje susidariusios modos veikia abi konstrukcijos pusės, dėl to garso izoliacija didėja 12 dB per oktavą.

4 regionas. Jungtys veikia kaip akustiniai tiltai tarp dviejų plokščių, todėl garso izoliacija didėja 6 dB per oktavą.

INSUL programinė įranga gali modeliuoti skirtingas konstrukcijas:

- Viengubos konstrukcijos, kurias gali sudaryti iki 6 standžiai sujungtų skirtingų medžiagų.
- Dvigubos konstrukcijos, kurias sudaro dvi skirtingos viengubos konstrukcijos (iki 6 standžiai sujungtų medžiagų), tarpusavyje atjungtos oro tarpu.
- Trigubos konstrukcijos, kurias sudaro trys skirtingos viengubos konstrukcijos (iki 6 standžiai sujungtų medžiagų), tarpusavyje atjungtos oro tarpu.

Atliekant skaitinį modeliavimą buvo taikomi du skirtingi metodai konstrukcijos garso izoliacijai nustatyti. Kadangi tiriamąją konstrukciją sudaro dvi standžios plokštės (gipso kartono plokštės), tarpusavyje sujungtos gumos granuliu plokšte, svarbu išsiaiškinti, ar tokią konstrukciją galima laikyti vienguba kelių sluoksnių konstrukcija, ar gumos granuliu plokštė veikia kaip oro tarpas tarp dviejų viengubų konstrukcijų.

Programoje išskiriamos trys konstrukcijos dalys: izoliuojanti medžiaga, absorbcinė medžiaga ir karkasas. Kiekviena iš šių dalių pasižymi skirtingais įvesties duomenimis. Izoliuojančios medžiagos įvesties duomenys:

- storis, mm;
- tankis, kg/m^3 ;
- Jungo modulis, GPa;
- papildomai išskaičiuojami parametrai:
- kritinis dažnis f_c , Hz;
- konstrukcijos masė, kg/m^2 .

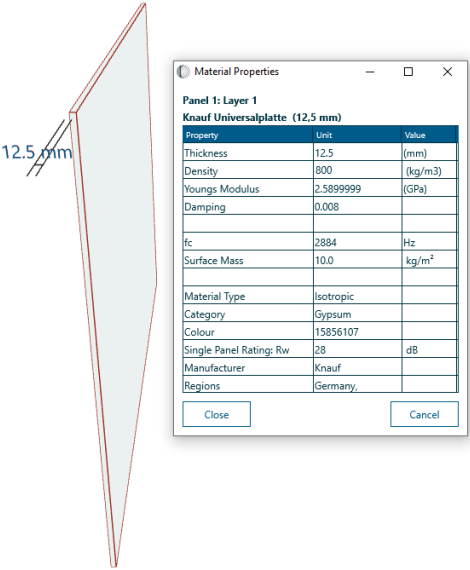
Pradedant modeliuoti galima pasirinkti konstrukcijos elementą iš duomenų bazės. Taip pat yra galimybė sukurti savo duomenų bazę, rankiniu būdu įvedant medžiagos įvesties duomenis (2.10 pav.).

Jeigu modeliuojamos viengubos kelių sluoksnių konstrukcijos, galima pridėti papildomą sluoksnį (daugiausia šešis) iš duomenų bazės arba parametrus suvesti ranka.

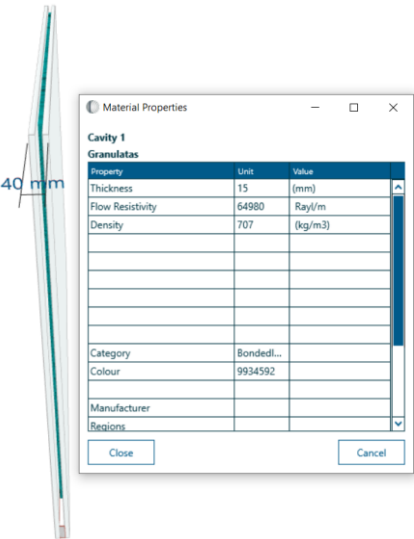
Jeigu modeliuojama dviguba konstrukcija, atsiranda papildomi įvesties duomenys.

Absorbcinės medžiagos įvesties duomenys (2.11 pav.):

- storis, mm;
- orinė varža $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$;
- tankis, kg/m^3 ;

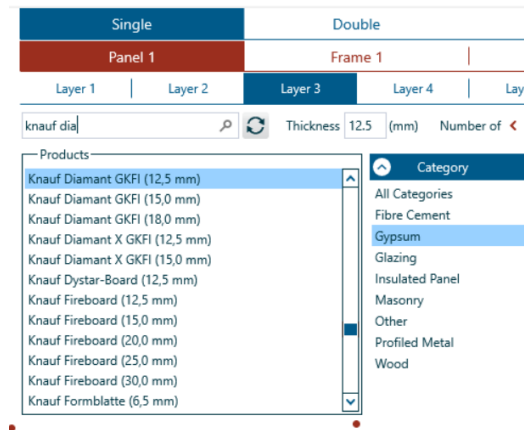


2.10 pav. Izoliuojančios medžiagos įvesties duomenys
Fig. 2.10. Insulating material input data



2.11 pav. Absorbcinės medžiagos įvesties duomenys
Fig. 2.11. Absorbing material input data

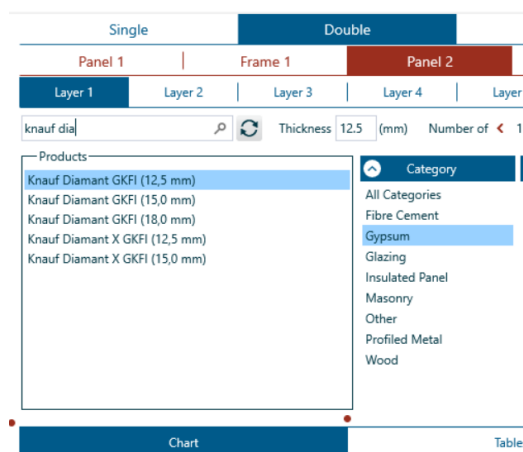
Modeliuojant viengubas konstrukcijas, susidarančias iš kelių sluoksnių, darbo lange pasirenkama „Single“ konstrukcija ir kiekviena konstrukciją sudaranti plokštė įvedama „Layer“ skiltyje (2.12 pav.).



2.12 pav. Viengubos konstrukcijos modeliavimas

Fig. 2.12. Modelling of a single structure

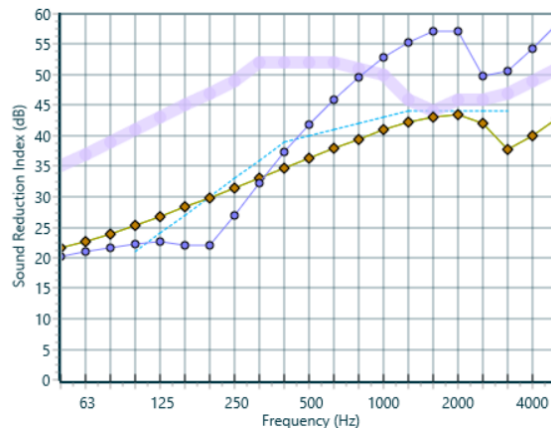
Modeliuojant dvigubas konstrukcijas, darbo lange pasirenkama „Double“ konstrukcija. Gipso kartono plokščių parametrai parenkami „Panel1“ skiltyje įvedant ją kaip „Layer1“. Gumos granulių plokštė parenkama „Frame1“ skiltyje ir įvedami jos parametrai. Kitos konstrukciją sudarančio gipso kartono plokštės parametrai parenkami „Panel2“ skiltyje įvedant ją kaip „Layer1“ (2.13 pav.).



2.13 pav. Dvigubos konstrukcijos modeliavimas

Fig. 2.13. Modelling of a double structure

Gauti rezultatai atvaizduojami darbo lange esančiame grafike, kur skirtingos konstrukcijos gali būti tarpusavyje palygintos (2.14 pav.).



2.14 pav. Duomenų vaizdavimo langas

Fig. 2.14. Data visualization window

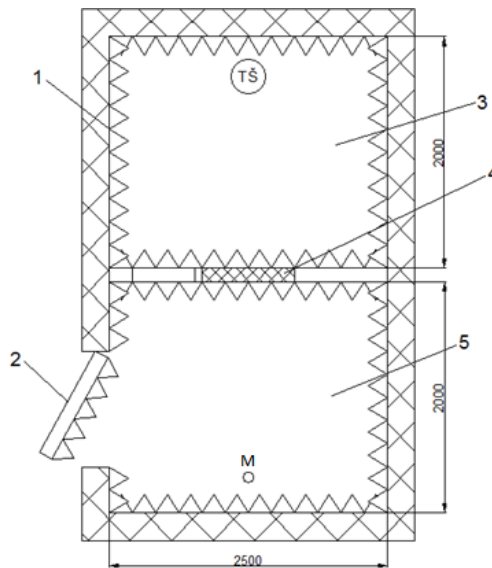
Atlikus konstrukcijos modeliavimą, rezultatai pateikiami grafike 1/3 oktavos dažnių juostoje.

2.6. Garsą izoliuojančio gaubto skaitinio modeliavimo metodika

Darbe suprojektuotas ir skaitiniu modeliavimu patikrintas garsą izoliuojantis gaubtas, kurio šonines sienes sudaro darbe nagrinėtos garsą izoliuojančios konstrukcijos su gipso kartono plokštėmis (GKFI) ir gumos granulių plokštėmis (25 ir 50 mm storio). Galinės gaubto sienelės įrengtos kaip žaliuzių konstrukcija, kurios paskirtis – užtikrinti tinkamą įrenginio ventiliaciją.

Galinių sienelių konstrukcijos efektyvumas pirmiausia buvo išmatuotas laboratorinėmis sąlygomis pusiau beaidėje kameroje, siekiant įvertinti konstrukcijos efektyvumą. Tyrimų metu buvo atlikti įneštinio silpninimo tyrimai, tiriant žaliuzių konstrukciją, kurią sudaro septynios metalinės plokštės, padengtos garsą sugeriančiomis medžiagomis (mineraline vata, polistireniniu putplasčiu ir trimis skirtingomis gumos granulių plokštėmis).

Bendras triukšmo slopinimo kameros vaizdas pateiktas 2.15 pav. Triukšmo slopinimo kamera susideda iš dviejų patalpų, perskirtų dviguba siena, ir greta esančios patalpos, skirtos matavimo aparatūrai. 1-oji patalpa sąlygiškai vadinama siunčiamojo garso kamera, 2-oji patalpa – priimamojo garso kamera.



2.15 pav. Triukšmo slopinimo kamera: 1 – sienos, padengtos akustiniu porolonu; 2 – durys; 3 – siunčiamojo garso patalpa; 4 – tiriamoji konstrukcija; 5 – priimamojo garso patalpa; M – mikrofono pozicija; TŠ – triukšmo šaltinis

Fig. 2.15. Noise reduction chamber. 1 – Wall covered with acoustic foam, 2 – doors, 3 – sound source room, 4 – sample, 5 – receiver room, M – microphone position, TŠ – sound source

Triukšmo slopinimo kameros patalpos tarpusavyje akustiškai izoliuotos. Tokia konstrukcija leidžia sumažinti netiesioginį garso pralaidumą tarp kameros patalpų, taip pat šios patalpos izoliuojamos nuo išorinio triukšmo ir taip iki minimalaus poveikio jose galima sumažinti foninį triukšmą. Kameros patalpas skiriančioje sienoje įrengta 1 m^2 dydžio anga, kurioje standžiai įtvirtinamas $1,0 \times 1,0 \text{ m}$ matmenų tiriamasis bandinys. Tiriamasis bandinys sudarytas iš septynių vienodų matmenų metalinių plokščių, kurių ilgis – 1 m , o plotis – $0,3 \text{ m}$. Ant plokščių montuojamos bandomosios medžiagos.

Matavimai atliekami plokštės paverčiant skirtingais kampais. Plokštės paverčiamos nuo 0 iki 45° kampu kas 15° . Viršutinė plokštės dalis atsukama viršutine dalimi į triukšmo šaltinį ir nuo triukšmo šaltinio (2.16 pav.).



2.16 pav. A – plokštės, atsuktos nuo triukšmo šaltinio; B – plokštės, atsuktos į triukšmo šaltinį; TŠ – triukšmo šaltinis; M – mikrofonas

Fig. 2.16. A – plates tilted away from the noise source; B – plates tilted towards the noise source; TŠ – sound source; M – microphone

Atliekant tyrimus, siunčiamojo garso patalpoje buvo parinktos dvi triukšmo šaltinio pozicijos. Priimamojo garso patalpoje buvo parinktos penkios skirtingos mikrofono pozicijos. Įneštinis silpninimas skaičiuojamas kaip slėgio lygio skirtumas, atliekant tyrimus be garsą mažinančios konstrukcijos ir su ja. Įneštinis silpninimas apskaičiuojamas pagal (2.47) formulę

$$IL = 20 \log \left(\frac{p_{be \text{ konstrukcijos}}}{p_{su \text{ konstrukcija}}} \right) = L_{p1} - L_{p2}, \quad (2.47)$$

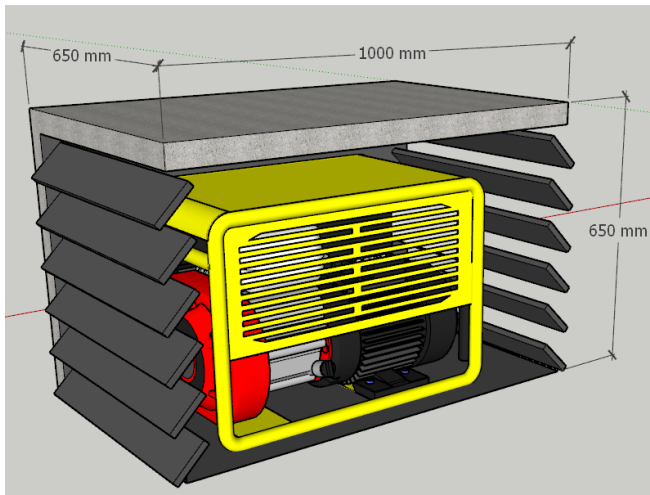
čia $p_{be \text{ konstrukcijos}}$ – garso slėgio lygis, nesumontavus konstrukcijos, dB;
 $p_{su \text{ konstrukcija}}$ – garso slėgio lygis, įrengus garsą mažinančią konstrukciją, dB;

Bandymų metu buvo išlaikytos šios sąlygos:

- atstumai tarp mikrofonų – >0,5 m;
- matavimo laikas – 30 s;
- signalo tipas – baltasis triukšmas.

Remiantis eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatais, kuriamas gaubtas, skirtas įrenginių triukšmui mažinti. Darbe suprojektuotas garsą izoliuojantis gaubtas, skirtas dyzelinio generatoriaus triukšmui mažinti. Garsą izoliuojančio gaubto 3D modelis buvo sudaromas panaudojant „Skechup Pro“ programinę įrangą. Garsą izoliuojančio gaubto matmenys (2.17 pav.):

- aukštis – 0,65 m.
- ilgis – 1,0 m.
- plotis – 0,65 m.



2.17 pav. Garsą izoliuojančio gaubto 3D modelis
Fig. 2.17. 3D model of the sound-insulating enclosure

Galinės gaubto sienelės buvo suformuotos kaip žaliuzių konstrukcija, kurią sudarė šešios plokštės, padengtos 25 mm ir 50 mm storio gumos plokštėmis. Jų garso sugerties tyrimai atlikti interferometru. Plokštės montuojamos taip, kad turėtų galimybę pakeisti posvyrio kampą nuo 0 iki 45°. Žaliuzių konstrukcijoje gumos granulių plokštės veikia kaip garsą sugerianti medžiaga.

Šoninės ir stogo plokštės suprojektuotos kaip garsą izoliuojančios konstrukcijos. Modeliuojant buvo parengtos skirtingos gaubto konstrukcijos, kurias sudarė 25 ir 50 mm storio gumos granulių plokštės su gipso kartono plokštėmis (GKFI) iš abiejų pusių. Konstrukcijų perdavimo sumažėjimo vertės buvo eksperimentiškai ištirtos interferometru.

Modeliuoti buvo atrinkta viena gumos granulių plokštė ir viena garsą izoliuojanti konstrukcija su gumos granulių plokšte, kurių garso sugerties ir garso perdavimo sumažėjimo vertės buvo pačios didžiausios.

Skirtingomis akustinėmis savybėmis pasižyminčios atitvarų konstrukcijos buvo sukurtos kaip skirtingi sluoksniai. Tai leido kiekvienam sluoksniui priskirti skirtingas medžiagas. Paskui modelis buvo įkeltas į „Odeon 16 Auditorium“ programinę įrangą.

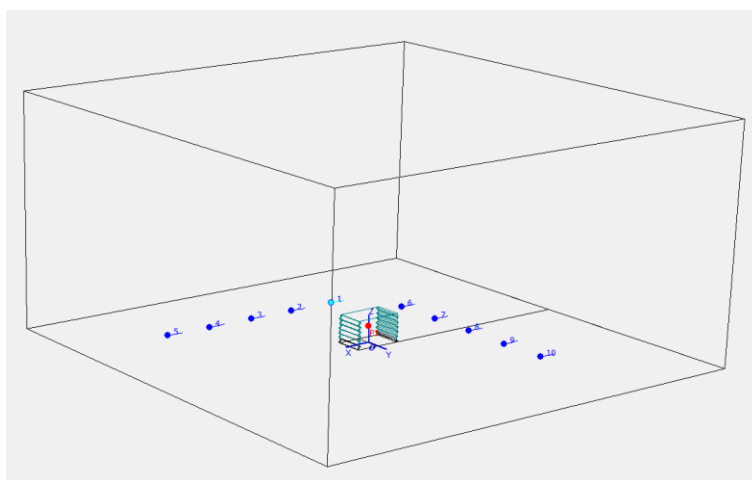
Pirmasis žingsnis – sukurti garso šaltinius ir priimtuvus. Garso šaltinis – dyzelinis generatorius. Jo garso galios lygiai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Dizelinio generatoriaus garso galio lygiai (BS 5228-1:2009)

Table 2.2. Sound power levels of diesel generator (BS 5228-1:2009)

Garso galios lygiai 1/1 oktavos dažnių juostoje, dB					
125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
102	97	92	90	86	87
Garso slėgio lygiai 1/3 oktavos dažnių juostoje 10 m atstumu nuo triukšmo šaltinio, dB					
125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
71	66	61	59	55	56

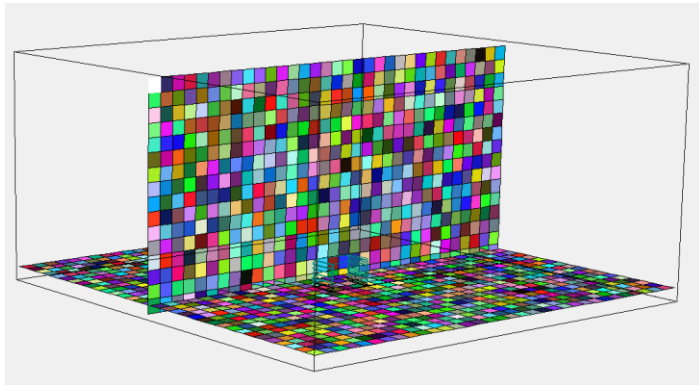
Triukšmo lygis modeliuojamas 10-yje skirtingų priimtuvo taškų. Atstumas tarp taškų – 1 m. 1–5 taškai buvo numatomi X ašyje, kuri buvo išilgai priekinės ir galinės sienų, o 6–10 taškai buvo išdėstyti Y ašyje, kuri buvo išilgai gaubto šoninių sienelių (2.18 pav.).



2.18 pav. Priimtuvo taškai X ir Y ašyse

Fig. 2.18. Receiver points on the X- and Y-axes

Charakterizavus visus sluoksnius, sukuriamas skaičiavimo tinklelis. Buvo sukurti du skirtingi tinkleliai – horizontalusis ir vertikalusis. Tinklelio dydis 0,3×0,3 m (2.19 pav.).



2.19 pav. Skaičiavimo tinklelis

Fig. 2.19. Calculation grid

Modeliuojant buvo apskaičiuotos garso slėgio lygio vertės 1–5 m atstumu nuo gaubto X (1–5 matavimo taškai) ir Y ašyje (6–10 matavimo taškai). Gaubto efektyvumas buvo sumodeliuotas devyniais skirtingais scenarijais:

1. Garso sklaida 1–5 m atstumu X ir Y ašyje be gaubto.
2. Garso sklaida 1–5 m atstumu X ir Y ašyje, gaubto plokštės padengiant 25 mm storio gumos granulių plokšte. Šoninės sienos ir stogas – 25 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų gipso kartono plokščių (GKFI). Plokštelės yra horizontalioje padėtyje.
3. Garso sklaida 1–5 m atstumu X ir Y ašyje, gaubto plokštės padengiant 25 mm storio gumos granulių plokšte. Šoninės sienos ir stogas – 25 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų gipso kartono plokščių (GKFI). Plokštelės pakreiptos 15° kampu.
4. Garso sklaida 1–5 m atstumu X ir Y ašyje, gaubto plokštės padengiant 25 mm storio gumos granulių plokšte. Šoninės sienos ir stogas – 25 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų gipso kartono plokščių (GKFI). Plokštelės pakreiptos 30° kampu.
5. Garso sklaida 1–5 m atstumu X ir Y ašyje, gaubto plokštės padengiant 25 mm storio gumos granulių plokšte. Šoninės sienos ir stogas – 25 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų gipso kartono plokščių (GKFI). Plokštelės pakreiptos 45° kampu.
6. Garso sklaida 1–5 m atstumu X ir Y ašyje, gaubto plokštės padengiant 50 mm storio gumos granulių plokšte. Šoninės sienos ir stogas – 50 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų gipso kartono plokščių (GKFI). Plokštelės yra horizontalioje padėtyje.

7. Garso sklaida 1–5 m atstumu X ir Y ašyje, gaubto plokštes padengiant 50 mm storio gumos granulių plokšte. Šoninės sienos ir stogas – 50 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų gipso kartono plokščių (GKFI). Plokštelės pakreiptos 15° kampu.
8. Garso sklaida 1–5 m atstumu X ir Y ašyje, gaubto plokštes padengiant 50 mm storio gumos granulių plokšte. Šoninės sienos ir stogas – 50 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų gipso kartono plokščių (GKFI). Plokštelės pakreiptos 30° kampu.
9. Garso sklaida 1–5 m atstumu X ir Y ašyje, gaubto plokštes padengiant 50 mm storio gumos granulių plokšte. Šoninės sienos ir stogas – 50 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų gipso kartono plokščių (GKFI). Plokštelės pakreiptos 45° kampu.

Atlikus tyrimus įvertintas gubto efektyvumas, mažinant įrenginio sukeliama triukšmą. Rezultatai lyginami tarpusavyje siekiant nustatyti optimalų plokščių posvyrio kampą bei išsiaiškinti, kaip kinta gaubto efektyvumas didinant gumos granulių plokštės storį konstrukcijoje.

2.7. Antrojo skyriaus išvados

1. Pasiūlyta gumos granulių plokščių gaminimo metodika, surišant tris skirtingos frakcijos gumos granules poliuretaniniais klijais. Naudojant trijų skirtingų frakcijų gumos granules, buvo sudaryta 15 skirtingos sudėties gumos granulių plokščių. Pateiktos gumos granulių fizinių savybių – tankio, dinaminio standumo ir orinės varžos – tyrimų metodikos.
2. Pateikta gumos granulių plokščių garso sugerties tyrimo metodika interferometru, kuria remiantis vertinama gumos granulių plokščių garso sugerties priklausomybė nuo gumos granulių plokštės granuliometrinės sudėties ir jų orinės varžos.
3. Pateikta gumos granulių plokščių garso perdavimo tyrimo metodika interferometru, kuria remiantis nustatomas garsą izoliuojančių konstrukcijų su gumos granulių plokšte garso perdavimo sumažėjimas, konstrukcijų rezonansiniai dažniai ir garso sumažėjimo priklausomybė nuo gumos plokštės storio ir jos granuliometrinės sudėties.
4. Pateikta įneštinio silpninimo tyrimo metodika ir sukurtas matavimo standas, skirtas laboratorinėmis sąlygomis ištirti didesnio skersmens (300×300 mm) mėginius, vertinant konstrukcijos įneštinio silpninimo

sumažėjimą, rezonansinius dažnius ir rezultatus lyginant su skaitinio modeliavimo INSUL programa rezultatais.

5. Pateikta skaitinio modeliavimo metodika, naudojant INSUL programinę įrangą. Taikomi du skirtingi metodai konstrukcijos garso izoliacijai nustatyti. Kai tiriamąją konstrukciją sudaro dvi standžios plokštės (gipso kartono plokštės), tarpusavyje sujungtos gumos granulių plokšte, svarbu išsiaiškinti, ar tokią konstrukciją galima laikyti vienguba kelių sluoksnių konstrukcija, ar gumos granulių plokštė veikia kaip oro tarpas tarp dviejų viengubų konstrukcijų, sudaranti dvigubą konstrukciją.
6. Pateikta garsą izoliuojančio gaubto skaitinio modeliavimo metodika 3D aplinkoje, naudojant „Odeon“ programinę įrangą. Modeliuojant sukuriamas 3D akustinis garsą izoliuojančio gaubto modelis, kurio konstrukcijoje panaudotos garsą izoliuojančios konstrukcijos su gumos granulių plokštėmis. Vertinamas garso slėgio lygio sumažėjimas X ir Y ašyse 1–5 m atstumu nuo garsą izoliuojančio gaubto.

Eksperimentinių, skaitinio ir teorinio modeliavimo tyrimų rezultatai

Tyrimų tikslas – pagaminti gumos granulių plokštes, naudojant tris skirtingas gumos granulių frakcijas, ir jas naudojant suprojektuoti garsą izoliuojantį gaubtą. Atlikti gumos granulių fizinių savybių tyrimai ir išanalizuota jų priklausomybė nuo gumos mėginio granuliometrinės sudėties. Atlikti garso sugerties ir garso perdavimo sumažėjimo tyrimai interferometru, lyginant gautus rezultatus su gumos granulių plokščių fizinėmis savybėmis. Laboratorinėmis sąlygomis specialiai sukurtame stende ištirtos didesnio skersmens (300×300 mm) garsą izoliuojančios plokštės. Tyrimų rezultatai patikrinami teoriniu perdavimo matricos metodu. Remiantis gautais rezultatais, suprojektuotas garsą izoliuojantis gaubtas ir jo efektyvumas sumodeliuotas skaitinio modeliavimo programa „Odeon“.

Skyriaus tematika išspausdinti penki moksliniai straipsniai (Vilniškis & Januševičius, 2023a, 2023b, 2024a, 2024b; Vilniškis et al. 2020).

3.1. Gumos granulių plokščių fizinių savybių tyrimai

Pagal 2.1 skyriuje nurodytą metodiką pagaminta 15 skirtingos granuliometrinės sudėties gumos granulių plokščių. Jų fizinės savybės pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Gumos granulių plokščių fizinės savybės**Table 3.1.** Physical properties of rubber granule panels

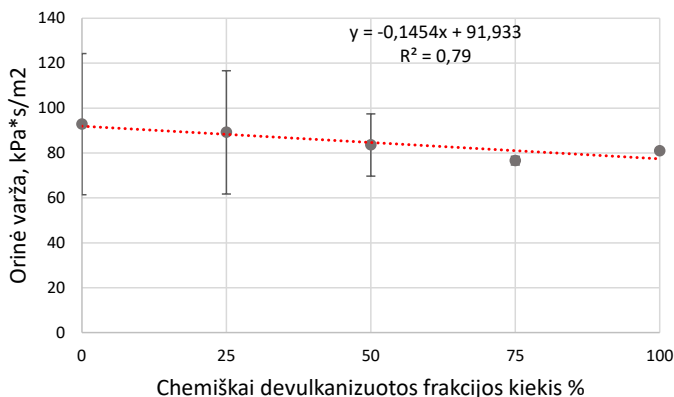
Nr.	Mėginys	Tankis, kg/m ³	Orinė varža, kPa·s/m ²	Dinaminis standumas, MN/m ³
1	(D0S0Ch100)	706,8±14,1	81,0±9,7	13,7±1,9
2	(D0S25Ch75)	697,4±7,0	75,3±9,0	12,4±1,7
3	(D0S50Ch50)	728,9±21,9	88,3±10,6	12,5±1,8
4	(D0S75Ch25)	776,8±19,4	96,2±11,5	10,8±1,5
5	(D0S100Ch0)	776,1±21,7	93,0±11,2	13,6±1,9
6	(D25S25Ch50)	737,4±15,5	94,4±11,3	11,3±1,6
7	(D25S50Ch25)	675,9±12,8	125,1±15,0	14,5±2,0
8	(D25S75Ch0)	737,3±20,6	110,5±13,3	13,9±1,9
9	(D25S0Ch75)	661,7±13,9	78,0±9,4	14,2±2,0
10	(D50S25Ch25)	733,6±13,2	125,0±15,0	9,4±1,3
11	(D50S50Ch0)	730,1±10,7	135,5±16,3	9,5±1,3
12	(D50S0Ch50)	747,7±15,0	68±8,2	8,8±1,2
13	(D75S25Ch0)	721,9±10,8	65,3±7,8	9,4±1,3
14	(D75S0Ch25)	697,6±16,0	68±8,2	8,8±1,2
15	(D100S0Ch0)	731,4±19,7	60,2±7,2	11,7±1,6

Remiantis atliktais gumos granulių plokščių fizinių savybių tyrimais, buvo atlikta orinės varžos, dinaminio standumo ir tankio priklausomybės analizė nuo gumos mėginio granulimetrinės sudėties.

Vertinant gumos granulių plokštės orinės varžos priklausomybę nuo skirtingų frakcijų kiekio (3.1 pav.), buvo nustatyta, jog orinė varža daugiausia priklauso nuo chemiškai devulkanizuotos gumos frakcijos kiekio plokštėje. Didinant chemiškai devulkanizuotos frakcijos kiekį mėginyje 25 %, orinė varža sumažėja 4,1 % ($p = 0,0438$). Orinės varžos priklausomybė nuo stambiosios frakcijos ($p = 0,0982$) ir smulkiosios frakcijos ($p = 0,2851$) nėra reikšminga.

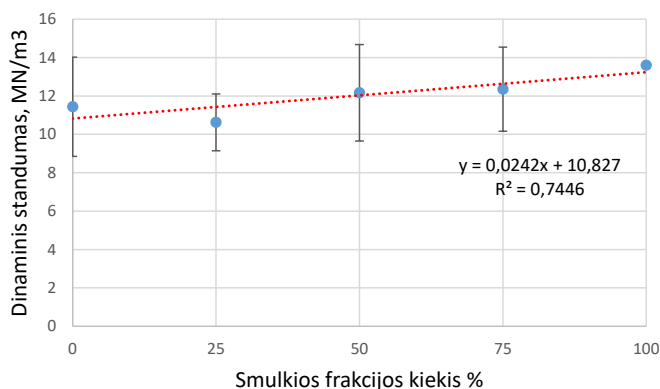
Analizuojant skirtingų gumos granulių plokščių dinaminio standumo rezultatus (3.2 pav.), buvo nustatyta, kad dinaminis standumas, padidinus smulkiosios frakcijos kiekį plokštėje 25 %, didėja 5,3 % ($i = 0,0488$), nes smulkiosios frakcijos gumos granulės suformuoja tankesnę struktūrą, dėl to gumos granulių plokštė yra standesnė. Vertinant dinaminio standumo priklausomybę nuo chemiškai devulkanizuotos frakcijos ($p = 0,125$) ir

stambiosios frakcijos kiekio ($p = 0,398$), buvo nustatyta, kad priklausomybės nėra reikšmingos, nes $p > 0,05$.



3.1 pav. Orinės varžos priklausomybė nuo chemiškai devulkanizuotos gumos frakcijos kiekio

Fig. 3.1. Dependence of airflow resistivity on the amount of chemically devulcanized rubber fraction

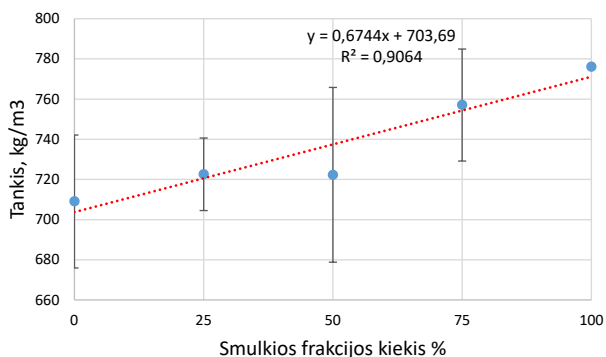


3.2 pav. Dinaminio standumo priklausomybė nuo smulkiosios gumos granulių frakcijos kiekio

Fig. 3.2. Dependence of dynamic stiffness on the amount of small rubber granule fraction

Analizuojant gumos granulių plokščių tankio priklausomybę nuo skirtingų gumos granulių frakcijų kiekio (3.3 pav.), nustatyta, kad, didinant smulkiosios frakcijos kiekį plokštėje 25 %, tankis didėja 2,3 % ($p = 0,0125$), nes smulkioji frakcija dėl mažo granulių dydžio sudaro tankesnę gumos granulių struktūrą.

Priklausomybės nuo chemiškai devulkanizuotos ($p = 0,174$) ir stambiosios ($p = 0,947$) frakcijos kiekio plokštėje nebuvo nustatytos ($p > 0,05$).



3.3 pav. Tankio priklausomybė nuo smulkiosios gumos granulių frakcijos kiekio

Fig. 3.3. Dependence of density on the amount of small rubber granule fraction

Bendrai analizuojant medžiagų fizines savybes, nustatyta, kad gumos granulių plokščių fizinės savybės daugiausia priklauso nuo smulkiosios ir chemiškai devulkanizuotos gumos granulių frakcijos. Gumos granulių plokštėje didinant chemiškai devulkanizuotų gumos granulių kiekį, galima sumažinti jos orinę varžą, nes dėl poringosios devulkanizuotų gumos granulių struktūros plokštėje yra daugiau porų, dėl to oras gali laisviau judėti plokštėje. Didinant smulkiosios frakcijos kiekį plokštėje, ji tampa tankesnė ir kietesnė. Tai patvirtina, kad didėja medžiagos tankis ir dinaminis standumas.

3.2. Medžiagų eksperimentiniai tyrimai interferometru

Šiame poskyryje pateikiami medžiagų garso sugerties ir garso perdavimo sumažėjimo tyrimai, kurie atliekami specialiaame medžiagų sugerties ir garso perdavimo sumažėjimui tirti skirtame stende – interferometre.

3.2.1. Garso sugerties tyrimai

Darbe atliekami gumos granulių mėginių garso sugerties tyrimai interferometru, siekiant išsiaiškinti gumos granulių plokščių garso sugerties priklausomybę nuo skirtingų gumos frakcijų kiekio mėginyje ir nuo mėginio orinės varžos. Gumos granulių plokščių garso sugerties tyrimai bus panaudoti garsą izoliuojančio gaubto konstrukcijai modeliuoti, kurio galinės sienos plokštės bus padengtos gumos

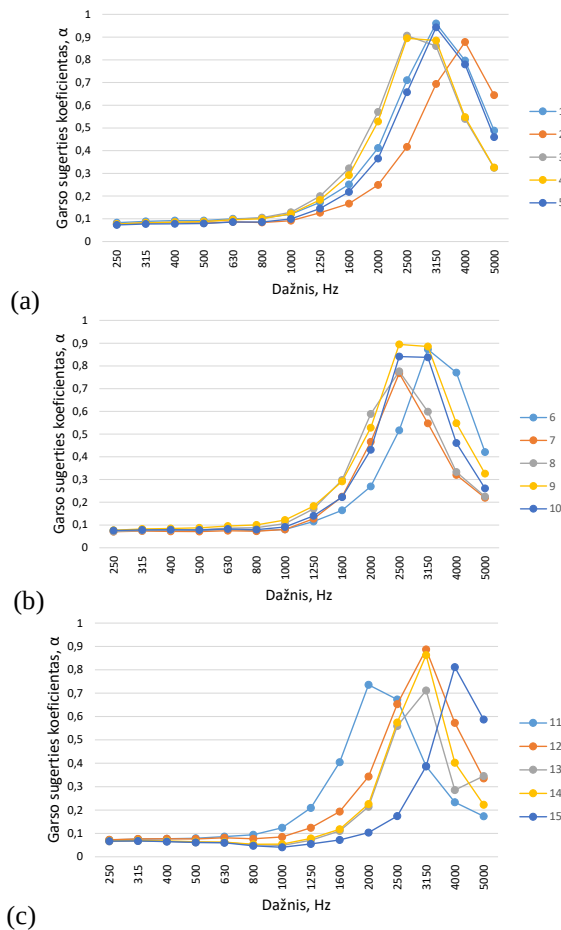
granulių plokštėmis užtikrinant, kad per konstrukciją pereinančią garso energiją sugeria gumos granulių plokštės.

Tyrimams atlikti naudojamos pagal 2.1 metodiką paruošti 30 mm skersmens gumos mėginiai, kurių storis – 15 ± 2 mm, 25 ± 2 mm ir 50 ± 2 mm. Visų tyrimams naudotų mėginių sudėtis aprašyta 2.1 lentelėje. Nuo 1 iki 5 plokštės yra mažinamas chemiškai devulkanizuotų gumos granulių kiekis nuo 100 % iki 0 %, kiekį mažinant kas 25 %, likusią dalį pakeičiant smulkiąja frakcija. 6–10 plokščių sudėtyje yra 25 % stambiosios frakcijos, išskyrus 10-ą gumos granulių plokštę, kurioje yra 50 % stambiosios frakcijos. Kita dalį sudėties sudaro skirtingi kiekiai smulkiosios frakcijos ir chemiškai devulkanizuotos gumos granulės. Į 11–15 sudėties gumos granulių plokščių sudėtį įtraukta nuo 50 % iki 100 % stambiosios frakcijos gumos granulių, likusią dalį užpildant smulkiosios frakcijos ir chemiškai devulkanizuotomis gumos granulėmis.

3.4 pav. pateikti 15 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių garso sugerties tyrimų rezultatai. 1–5 gumos granulių plokščių tyrimų rezultatai rodo, jog dažnių juostoje nuo 250 Hz iki 800 Hz garso sugertis yra apie 0,1–0,15, nes buvo tirti ploni – 15 ± 2 mm storio – mėginiai. Tiriant 15 ± 2 mm storio gumos mėginius, garso sugertis pradeda didėti nuo 1000 Hz ir pasiekia didžiausias vertes ties 2000–4000 Hz. Atlikus tyrimus nustatyta, kad visi mėginiai pasiekia iki 0,9–0,95 garso sugertį, tačiau pikai yra ties skirtingais dažniais. Tai priklauso nuo to, kad skiriasi mėginių orinė varža. Remiantis rezultatais, mažėjant orinei varžai garso sugerties pikas slenkasi link aukštesniųjų dažnių. Atlikti tyrimai rodo, jog didžiausia garso sugertis buvo nustatyta tiriant 1 ir 5 plokštes, kurios abi buvo sudarytos iš vienos rūšies granulių. Šiuo atveju 1 plokštė yra iš 100 % chemiškai devulkanizuotų gumos granulių, o 5 mėginį sudarė 100 % smulkiosios frakcijos guma.

6–10 sudėties gumos granulių plokščių garso sugerties tyrimų rezultatai rodo, jog dažniuose nuo 250 Hz iki 800 Hz visų mėginių išmatuota garso sugertis siekia iki 0,1. Garso sugerties vertės didėja nuo 1000 Hz ir sugerties piką pasiekia ties 2500–3150 Hz. Remiantis tyrimų rezultatais nustatyta, kad geriausi garso sugerties rezultatai buvo nustatyti tiriant 9 ir 10 gumos granulių mėginius. Lyginant šių mėginių sudėtį, 9 gumos granulių mėginį sudarė 75 % chemiškai devulkanizuotų gumos granulių, o 10 mėginį – 50 % stambiosios frakcijos. Todėl galima teigti, kad šiuo atveju geresne garso absorbcija pasižymi medžiagos, kurioje yra mažiau smulkiosios frakcijos. Tai patvirtina ir tyrimai, nes prasčiausi garso sugerties rezultatai buvo gauti tiriant 7 ir 8 gumos granulių mėginius, kuriose atitinkamai buvo 50 ir 75 % smulkiosios frakcijos gumos granulių.

Vertinant 11–15 sudėties gumos granulių plokščių garso sugerties tyrimų rezultatus, nustatyta, jog dažniuose nuo 250 Hz iki 800 Hz nėra didelio skirtumo tarp skirtingų plokščių garso sugerties – vertės siekia iki 0,1. Kaip ir pirmais atvejais, tiriant 1–10 gumos granulių mėginius, garso sugerties vertės pradeda didėti tik nuo 1000 Hz ir geriausias vertes pasiekia ties 1600–4000 Hz.



3.4 pav. 15±2 mm storio gumos granulių plokščių garso sugerties tyrimo rezultatai:

a – 1–5 gumos granulių plokštė; b – 6–10 gumos granulių plokštė;

c – 11–15 gumos granulių plokštė

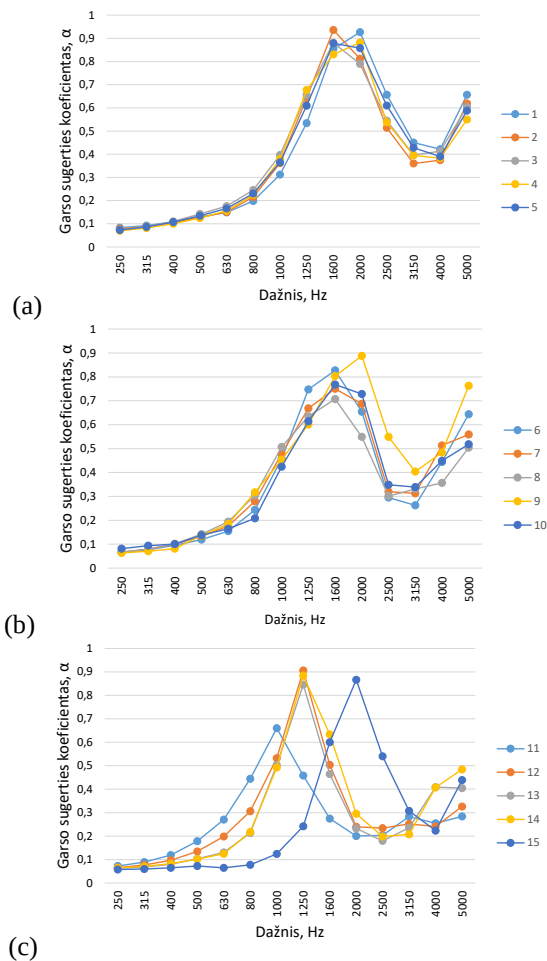
Fig. 3.4. Sound absorption test results of 15±2 mm thick rubber granule panels:

a – 1–5 rubber granule panel; b – 6–10 rubber granule panel;

c – 11–15 rubber granule panel

Tyrimų rezultatai rodo, jog geriausiai garsą sugeria plokštė Nr. 12 (50 % stambioji frakcija ir 50 % chemiškai devulkanizuota frakcija), Nr. 14 (75 % stambioji frakcija ir 25 % chemiškai devulkanizuota frakcija). Šių mėginių garso sugerties vertės siekia iki 0,9. Žemiausi rezultatai buvo gauti tiriant 11 ir 13 gumos granulių mėginius, į kurių sudėtį atitinkamai įtraukta 50 ir 25 % smulkiosios frakcijos gumos. Šių mėginių garso sugertis siekia iki 0,7. Taip pat nustatyta, kad

garso sugerties pikai pasiekiami esant skirtingiems dažniams. Lyginant 11 ir 15 mėginio rezultatus, nustatyta, jog pikai pasiekiami atitinkamai esant 2000 ir 4000 Hz. Tai priklauso nuo to, jog šių plokščių orinė varža skiriasi daugiau nei du kartus. 11-os plokštės orinė varža $\sigma = 135,5 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$, 15-os – $60,2 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$.



3.5 pav. 25±2 mm storio gumos granulių plokščių garso sugerties tyrimo rezultatai:
a – 1–5 gumos granulių plokštė; b – 6–10 gumos granulių plokštė;
c – 11–15 gumos granulių plokštė

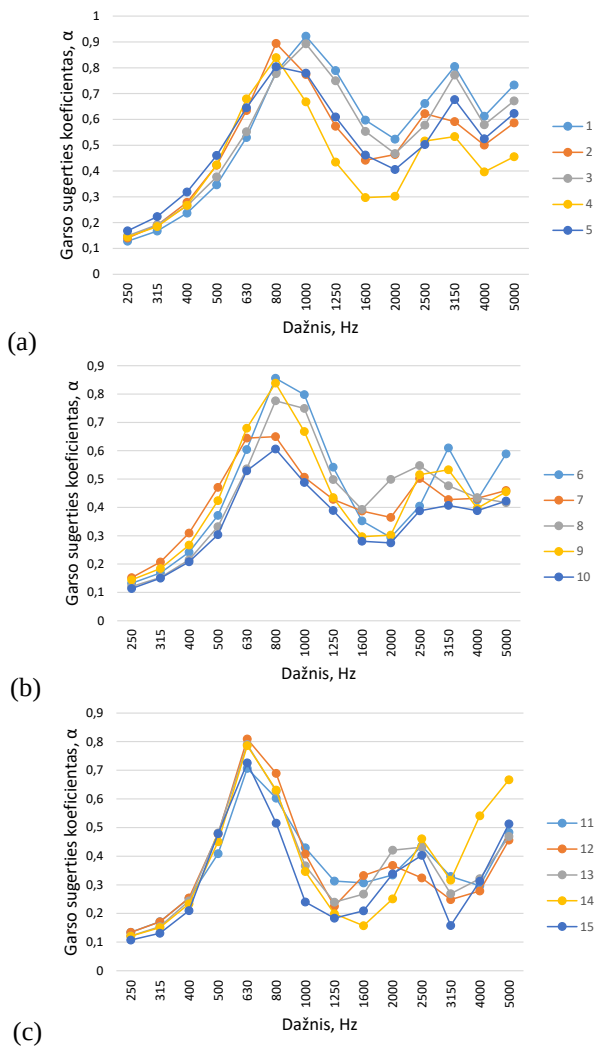
Fig. 3.5. Sound absorption test results of 25±2 mm thick rubber granule panels:
a – 1–5 rubber granule panel; b – 6–10 rubber granule panel;
c – 11–15 rubber granule panel

3.5 pav. pateikti 25 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių garso sugerties tyrimų rezultatai. Vertinant 1–5 gumos granulių plokštes nustatyta, kad garso sugertis nuo žemųjų dažnių link aukštųjų didėja ir esant 1600–2000 Hz pasiekia savo piką. Esant žemiesiems ir vidutiniams dažniams garso sugerties vertės yra minimalios, vertė 250–1000 Hz dažnių diapazone siekia nuo 0,1 iki 0,4. Didžiausios garso sugerties vertės pasiekiamos esant aukštiesiems dažniams ir siekia 0,9. Lyginant skirtingų mėginių garso sugertį, rezultatai yra labai panašūs, didžiausios vertės svyruoja nuo 0,88 iki 0,93. 25 ± 2 mm gumos granulių mėginiai turi du ryškius pikus, nuo pirmojo piko garso sugerties vertės krinta, esant 3150–4000 Hz siekia apie 0,4, vėliau vėl pakyla ir pasiekia antrą piką esant 5000 Hz, kur vertės svyruoja nuo 0,55 iki 0,66.

Analizuojant 6–10 gumos granulių mėginių garso sugerties rezultatus, nustatyta, jog pikai pasiekiami esant 1600–2000 Hz. Esant žemiesiems ir vidutiniams dažniams iki 1000 Hz, garso sugerties vertės kyla nuo 0,1 iki 0,5. Aukščiausios vertės pasiekiamos esant vidutiniams 1600–2000 Hz dažniams, vertės svyruoja nuo 0,71 iki 0,88. Didžiausia sugertis gaunama su 9 gumos granulių plokšte, kuris turi daugiausia chemiškai devulkanizuotos gumos granulių (75 %). Pasiekus piką, sugerties vertės mažėja, esant 3150 Hz pasiekia mažiausias vertes (0,26–0,4) ir esant 5000 Hz pasiekia antrą piką, kai vertės yra 0,50–0,76.

Vertinant 11–15 gumos granulių mėginių garso sugerties rezultatus, nustatyta, kad 12–14 mėginių pikai pasiekiami esant 1250 Hz, 11 mėginio – esant 1000 Hz, o 15 – esant 2000 Hz. Tai aiškinama tuo, kad medžiagų orinė varža skiriasi daugiau nei du kartus. Didėjant orinei varžai, garso sugerties verčių pikai slenkasi žemesnių dažnių link. Esant žemiesiems ir vidutiniams dažniams iki 1000 Hz, garso sugerties vertės kyla nuo 0,1 iki 0,65. Aukščiausios vertės pasiekiamos esant vidutiniams 1000–2000 Hz dažniams, vertės svyruoja nuo 0,66 iki 0,90. Geriausias garso sugerties rezultatas pasiekiamas su 12-ta gumos granulių plokšte, į kurią įeina 50 % stambiosios frakcijos ir 50 % chemiškai devulkanizuotos frakcijos granulių. Pasiekus piką, sugerties vertės mažėja, esant 2500 Hz pasiekia mažiausias vertes 0,18–0,20. Esant 4000–5000 Hz aukštiesiems dažniams, atsiranda antras pikas, kai vertės yra 0,28–0,48.

3.6 pav. pateikti 50 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių garso sugerties tyrimų rezultatai. Vertinant 1–5 gumos granulių plokštes, nustatyta, jog garso sugertis nuo žemųjų dažnių link aukštųjų didėja ir ties 800–1000 Hz pasiekia savo piką. Esant žemiesiems ir vidutiniams dažniams, garso sugerties vertė 250–1000 Hz dažnių diapazone didėja nuo 0,12 iki 0,92. Didžiausios garso sugerties vertės pasiekiamos esant aukštiesiems dažniams ir siekia 0,78–0,92. Lyginant skirtingų gumos mėginių garso sugertį, nustatyta, jog didžiausias vertes pasiekia 1, 2, 3 gumos granulių plokštės. Šiuose mėginiuose buvo atitinkamai 100, 75 ir 50 % chemiškai devulkanizuotų gumos granulių.



3.6 pav. 50±2 mm storio gumos granulių plokščių garso sugerties tyrimo rezultatai:

a – 1–5 gumos granulių plokštė; b – 6–10 gumos granulių plokštė;

c – 11–15 gumos granulių plokštė

Fig. 3.6. Sound absorption test results of 50±2 mm thick rubber granule panels.

a – 1–5 rubber granule panel; b – 6–10 rubber granule panel;

c – 11–15 rubber granule panel

Gumos mėginiai turi kelis ryškius pikus. 25 mm storio mėginiai turėjo du pikus, o 50 mm storio mėginiai – jau tris. Antras pikas pasiekiamas esant 2500–

3150 Hz, kai vertės siekia 0,54–0,8, o trečias pikas – esant 5000 Hz ir vertės siekia 0,49–0,73.

Analizuoiant 6–10 gumos granulių plokštės nustatyta, jog garso sugertis kaip ir kitais atvejais nuo žemųjų dažnių link aukštųjų didėja ir ties 800 Hz pasiekia didžiausias garso sugerties vertes. Esant žemiesiems ir vidutiniams dažniams garso sugerties vertė 250–800 Hz dažnių diapazone didėja nuo 0,12 iki 0,86. Didžiausios garso sugerties vertės pasiekiamos esant vidutiniams dažniams (800 Hz) ir siekia 0,65–0,86. Didžiausios garso sugerties vertės pasiekiamos su 6 ir 9 gumos granulių plokštėmis, į kurių sudėtį įeina atitinkamai 50 ir 75 % chemiškai devulkanizuotų gumos granulių. Kaip ir pirmu atveju, garso sugertis turi tris ryškius pikus. Antras pikas pasiekiamas esant 2500–3150 Hz, kai vertės siekia 0,4–0,6, o trečias pikas – ties 5000 Hz ir vertės siekia 0,42–0,59.

Atlikus 11–15 gumos granulių plokščių tyrimus nustatyta, jog garso sugertis nuo žemųjų dažnių link aukštųjų didėja, 1 piką pasiekia esant 630 Hz, kai skirtingų mėginių vertės svyruoja nuo 0,7 iki 0,82. Esant žemiesiems ir vidutiniams dažniams, garso sugerties vertė 250–630 Hz dažnių diapazone siekia nuo 0,11 iki 0,82. Geriausias garso sugerties rezultatas pasiekiamas su 12 gumos granulių plokšte, kurios sandara – 50 % stambiosios frakcijos ir 50 % chemiškai devulkanizuotos frakcijos. Kaip ir kitais atvejais, garso sugertis turi tris ryškius pikus. Antras pikas pasiekiamas esant 2000–2500 Hz, kai vertės siekia 0,34–0,46, o trečias pikas – esant 5000 Hz ir vertės siekia 0,46–0,67.

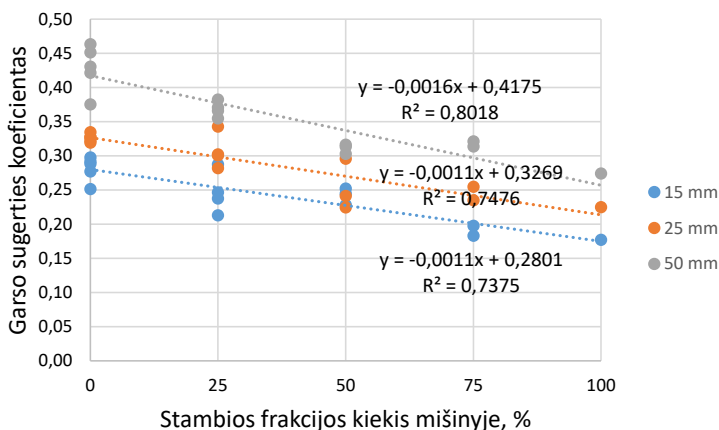
Vertinant bendrus rezultatus nustatyta, kad geriausiai garso sugerties rezultatais pasižymi 1–5 gumos granulių plokštės. 1–5 plokštėse nėra stambiosios frakcijos granulių. Atsižvelgiant į garso sugerties rezultatus, išryškėja labai aiški tendencija, kad, didinant stambiosios frakcijos kiekį, garso sugerties rezultatai prastėja. Lyginant skirtingo storio gumos mėginius buvo nustatyta, jog, didinant mėginio storį, garso sugerties verčių pikai nustatomi esant žemesniems dažniams, mes, didinant plokštės storį, sugeriamos didesnio bangos ilgio garso bangos. Gumos granulių mėginiai yra granuluotos sudėties, dėl to didinant mėginių storį atsiranda keli pikai. 15 mm storio mėginiai turi 1 piką esant 2000–4000 Hz, 25 mm storio mėginiai pasiekia pikus esant 2000–3000 Hz ir 5000 Hz. 50 mm storio mėginiai turi tris pikus, kur pirmas pikas pasiekiamas esant 630–800 Hz, antra – esant 2500–3150 Hz, trečias – esant 5000 Hz. Dėl šios priežasties skirtingo storio gumos granulių plokštės gali būti pritaikomos skirtingais atvejais, atsižvelgiant į tai, kokia dažnio garsą reikia sugerti.

Atlikus eksperimentinius tyrimus buvo apskaičiuoti skirtingo storio gumos granulių plokščių vidutiniai garso sugerties koeficientai ir α_w vertės, kuriais remiantis buvo atlikta garso sugerties priklausomybės analizė nuo skirtingos gumos granulių frakcijos kiekio gumos granulių plokštėje.

3.2 lentelė Garso sugerties rezultatai**Table 3.2.** Results of sound absorption

Mėginio Nr.	Mėginio storis, mm					
	15 mm		25 mm		50 mm	
	Vidutinis garso sugerties koeficientas	α_w	Vidutinis garso sugerties koeficientas	α_w	Vidutinis garso sugerties koeficientas	α_w
1	0,30	0,15	0,33	0,25	0,46	0,40
2	0,25	0,15	0,32	0,25	0,42	0,45
3	0,29	0,15	0,33	0,25	0,45	0,40
4	0,29	0,15	0,32	0,25	0,38	0,45
5	0,28	0,15	0,33	0,25	0,43	0,45
6	0,25	0,15	0,30	0,25	0,38	0,40
7	0,21	0,15	0,30	0,25	0,35	0,45
8	0,24	0,15	0,28	0,25	0,37	0,40
9	0,29	0,15	0,34	0,25	0,37	0,40
10	0,25	0,15	0,30	0,25	0,30	0,35
11	0,23	0,15	0,22	0,20	0,31	0,35
12	0,24	0,15	0,24	0,25	0,32	0,35
13	0,18	0,10	0,24	0,20	0,31	0,40
14	0,20	0,10	0,25	0,20	0,32	0,35
15	0,18	0,10	0,23	0,20	0,27	0,30

3.7 pav. pateikta vidutinio garso sugerties koeficiento priklausomybė nuo stambiosios frakcijos kiekio mėginio mišinyje. Vertinant visų storių mėginius matoma aiški tendencija, kad, didinant stambiosios frakcijos kiekį mišinyje kas 25 %, garso sugerties vertės krinta. Priklausomybės patvirtina ir determinacijos koeficientas, kur 15 mm storio gumos plokštės $R^2 = 0,738$ ($p = 0,0000415$), 25 mm storio gumos plokštės $R^2 = 0,748$ ($p = 0,0000319$), 50 mm storio gumos plokštės $R^2 = 0,802$ ($p = 0,00000644$). Vertinant rezultatus pagal regresijos kreivės formulę, padidinus stambiosios frakcijos kiekį 25 %, 15 ± 2 mm storio mėginių vidutinė garso sugertis sumažėja 9,8 %, 25 ± 2 mm mėginių sumažėja 8,4 %, o 50 ± 2 mm storio mėginių garso sugertis sumažėja 9,6 %.

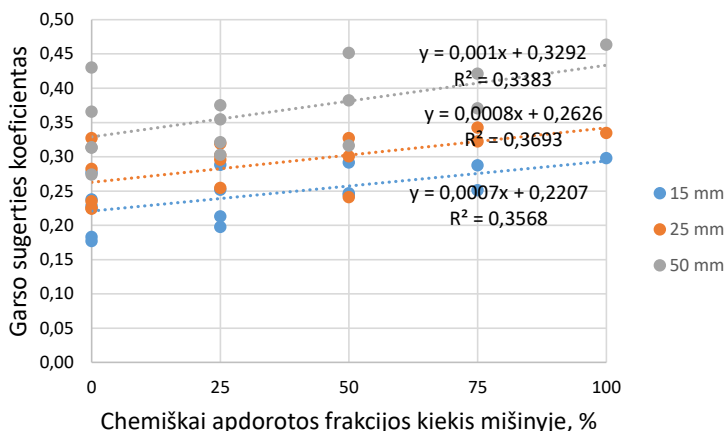


3.7 pav. Vidutinio garso sugerties koeficiento priklausomybė nuo stambiosios frakcijos kiekio (%) mišinyje

Fig. 3.7. Dependence of the average sound absorption coefficient on the amount of large fraction (%) in the mixture

Analizuojant visų storių mėginius nustatyta tendencija, kad, didinant smulkiosios frakcijos kiekį mišinyje kas 25 %, garso sugerties vertės didėja, tačiau nėra ryškių tiesinių priklausomybių, nes determinacijos koeficiento vertės yra $R^2 < 0,25$, $p > 0,05$.

3.8 pav. pateikta vidutinio garso sugerties koeficiento priklausomybė nuo chemiškai devulkanizuotos frakcijos kiekio mėginio mišinyje.

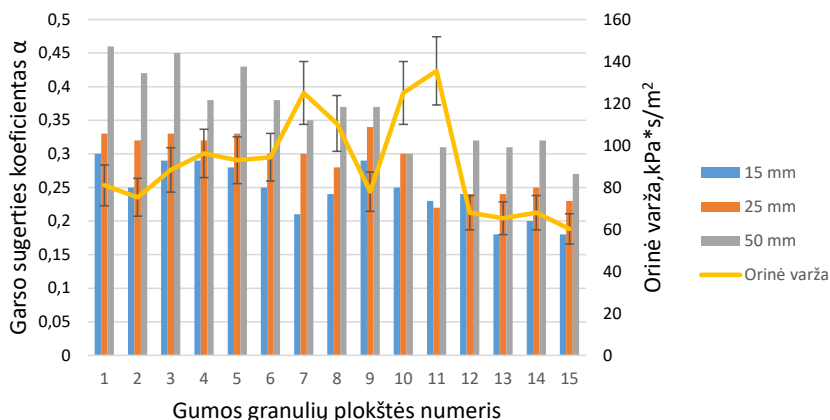


3.8 pav. Vidutinio garso sugerties koeficiento priklausomybė nuo chemiškai devulkanizuotos frakcijos kiekio mišinyje

Fig. 3.8. Dependence of the average sound absorption coefficient on the amount of chemically devulcanized fraction (%) in the mixture

Tendencija tokia, kad, didinant chemiškai devulkanizuotos frakcijos kiekį mišinyje kas 25 %, garso sugerties vertės didėja, determinacijos koeficiento vertės su 15 mm storio gumos plokštėmis siekia $R^2 = 0,357$ ($p = 0,0187$), su 25 mm storio gumos plokštėmis $R^2 = 0,369$ ($p = 0,0163$), su 50 mm storio gumos plokštėmis $R^2 = 0,338$ ($p = 0,0229$). Vertinant rezultatus pagal regresijos kreivės formulę, padidinus chemiškai devulkanizuotos frakcijos kiekį 25 %, 15 ± 2 mm storio mėginių vidutinė garso sugertis didėja 7,9 %, 25 ± 2 mm mėginių garso sugertis didėja 7,6 %, 50 ± 2 mm storio mėginių didėja 7,6 %.

Bendrai vertinant garso sugerties priklausomybę nuo sandaros, nustatyta, jog, norint padidinti gumos granulių mėginio garso sugerties vertes, mėginyje reikia didinti chemiškai devulkanizuotos frakcijos kiekį arba mažinti stambiosios frakcijos kiekį. Garso sugertis, didinant smulkiosios frakcijos kiekį mėginyje, taip pat didėja, tačiau nebuvo nustatyta tiesinės priklausomybės.



3.9 pav. Vidutinio garso sugerties koeficiento priklausomybė nuo gumos granulių plokštės orinės varžos

Fig. 3.9. Dependence of the average sound absorption coefficient on the flow resistivity of the rubber granule plate

Vertinant gumos granulių plokščių garso sugerties priklausomybes nuo jų orinės varžos (3.9 pav.), nustatyta, kad aukštesniais garso sugerties rezultatais pasižymi gumos granulių plokštės, kurių orinės varžos rezultatai yra nuo 80 iki 95 $\text{kPa} \cdot \text{s/m}^2$ ir tai yra optimalus orinės varžos parametras gumos granulių plokštėms. Jeigu orinė varža yra didesnė arba mažesnė už šiuos režius, garso sugerties vertės mažėja. Tokia tendencija atitinka kitų autorių tyrimus. Kuo didesnė orinė varža, tuo mažesnis oro pralaidumas, dėl to garso bangos negali patekti į medžiagas, todėl sumažėja garso sugertis. Tačiau, sumažinus oro srauto varžą, transformacijos iš garso energijos į šiluminę energiją efektyvumas

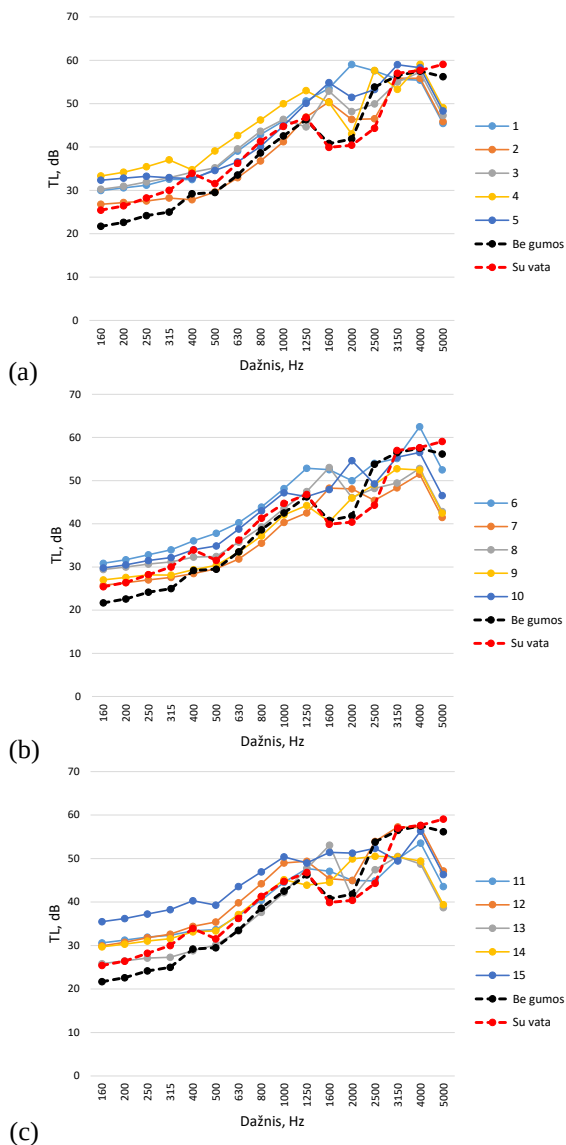
sumažėja. Todėl yra optimali oro srauto varžos vertė, kad būtų pasiekta geriausia garso sugertis (Liu et al., 2014; Hosseinpour et al., 2022).

3.2.2. Garso perdavimo sumažėjimo tyrimai

Darbe atliekami garso perdavimo sumažėjimo tyrimai, siekiant nustatyti kelių sluoksnių konstrukcijų, susidedančių iš dviejų sluoksnių gipso kartono ir gumos granulių plokštės tarp jų. Gauti tyrimų rezultatai palyginami su gumos granulių plokščių fizinėmis savybėmis. Garso perdavimo sumažėjimo vertės bus panaudotos modeliuojant garsą izoliuojančio gaubto garso sklaidą.

Pagal 2.2.1 skirsnyje aprašytą metodiką interferometru atlikti konstrukcijų, sudarytų iš dviejų gipso kartono plokščių ir gumos granulių mėginio (15 ± 2 mm, 25 ± 2 mm ir 50 ± 2 mm storio) garso perdavimo sumažėjimo tyrimai. Konstrukcijoms buvo panaudotos dvi skirtingos gipso kartono plokštės. Mažesnio tankio gipso kartono plokštė, skirta sausosios statybos sistemoms (GKB) (680 kg/m^3) ir padidinto tankio gipso kartono plokštė, kuri naudojama sausose sistemose, kurioms keliami gaisrinės saugos, garso izoliacijos ir fizinio stiprumo reikalavimai (GKFI) (1030 kg/m^3). Tokio tipo gipso kartono plokštės parinktos atsižvelgiant į tai, kad tai dažniausiai statyboje naudojamos plokštės, skirtos sienų garso izoliacijai gerinti. Konstrukcijų pavadinimas grafikuose priklauso nuo gumos mėginio numerio, pateikto 2.1 lentelėje.

3.10 pav. pateikti 15 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių su gipso kartono plokštėmis (GKB) garso perdavimo sumažėjimo rezultatai. Bendras konstrukcijos storis – 40 ± 2 mm. Analizuojant rezultatus, nustatyta, jog visais atvejais konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertės esant žemiesiems dažniams palaipsniui kyla iki 400–500 Hz. Šiuo atveju rezonansinis dažnis esant žemiesiems dažniams nėra ryškus, nes garso perdavimo sumažėjimo vertės priklauso daugiau nuo gumos granulių plokštės tankio nei jo storio. Nuo rezonansinio dažnio vertės kyla vidutiniškai 8 dB per oktavą. Toks kilimas priklauso nuo masės dėsnio, šioje vietoje garso izoliacija labiausiai priklauso nuo konstrukcijos masės. Esant žemiesiems dažniams geriausia garso izoliacija pasižymi konstrukcijos su tankesniu gumos granulių mėginiu, šiuo atveju 1, 4, 5, 15 konstrukcijos. 2000–2500 Hz vidutinių dažnių juostoje konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertės sumažėja, tai priklauso nuo rezonansinio dažnio, kuris susidaro dėl rezonansinių modų tarp dviejų plokščių. Nuo rezonansinio dažnio konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertės vėl kyla ir pasiekia didžiausias vertes esant 4000–5000 Hz iki 60 dB. Vertinant bendrai visų konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertes, ryškėja aiški tendencija, kad konstrukcijos su tankesne gumos granulių plokšte duoda geresnius garso sumažėjimo rezultatus, nes konstrukcijos garso izoliaciją daugiausia nusako jos masė.



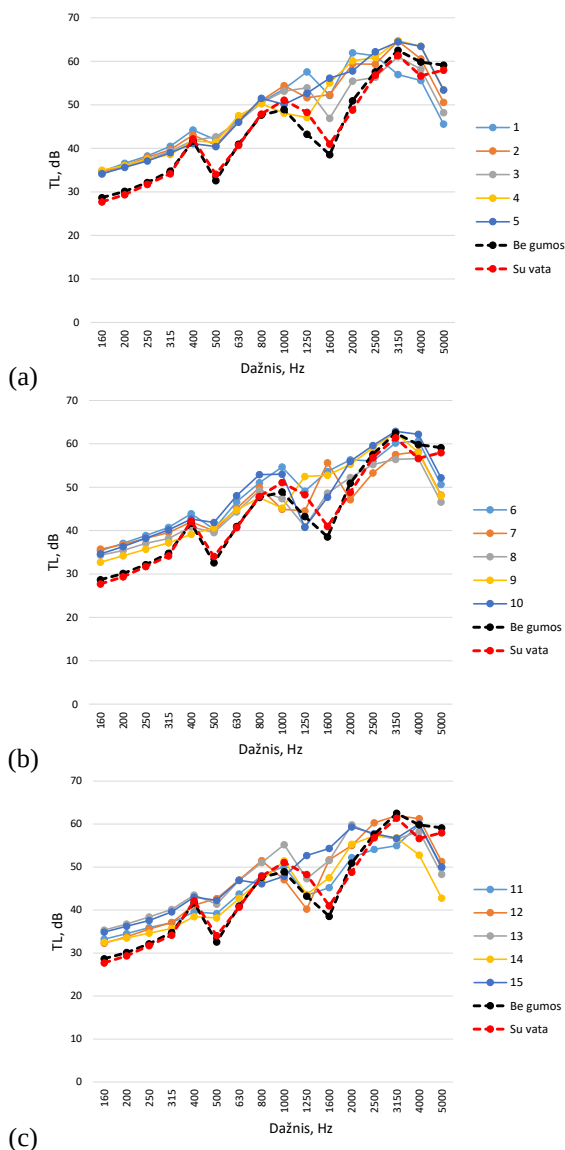
3.10 pav. 15±2 mm storio gumos granulių mėginių su gipso kartono plokštėmis (GKB) garso perdavimo sumažėjimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1–5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6–10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11–15 gumos granulių plokštėmis

Fig. 3.10. Sound transmission loss results of 15±2 mm thick rubber granule samples with gypsum board (GKB) samples: a – construction with 1–5 rubber granule panels; b – construction with 6–10 rubber granule panels; c – construction with 11–15 rubber granule panels

Vertinant rezultatus matoma tendencija, kad 6–10 konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertės yra mažesnės, lyginant su kitomis. Šios konstrukcijos išsiskiria tai, jog gumos granulių mišinius sudaro tam tikru santykiu sumaišytos trys skirtingos gumos granulių frakcijos, o visus kitus gumos mėginius sudaro dviejų ar vienos frakcijų granulės. Iš tyrimų rezultatų galima teigti, jog geriausia šiuo atveju naudoti iš vienos frakcijos sudarytas gumos granulių plokštes 1, 5, 15. Taip pat matoma tendencija, kad konstrukcijų, kurių gumos granulių plokštę sudaro stambiosios ir smulkiosios frakcijos gumos granulės, garso perdavimo sumažėjimo vertės yra blogesnės.

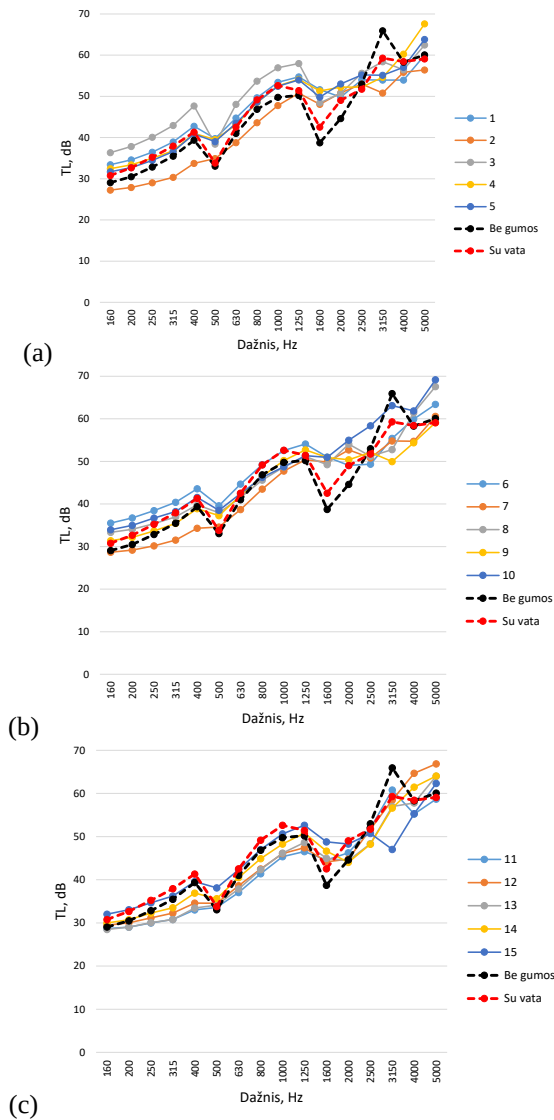
Papildomai buvo atlikti konstrukcijų tyrimai, kur tarp dviejų gipso kartono plokščių buvo mineralinė vata arba paliekamas tuščias oro tarpas. Bendras konstrukcijos storis nesikeičia. Remiantis literatūra, oro tarpo užpildymas garsą sugeriančia medžiaga pagerina garso izoliaciją ties rezonansiniais dažniais. Tokia pati tendencija nustatyta atlikus tyrimus. Konstrukcijos su gumos granulių plokštėmis dėl didesnės bendros konstrukcijos masės garsą izoliuoja geriau visu dažnių diapazonu. Taip pat nustatyta, jog konstrukcijų, kai oro tarpas užpildomas gumos granulių mėginiais, garso izoliacija esant 1600–2000 Hz rezonansiniam dažniui yra aukštesnė 5–10 dB. Taip pat nustatyta, kad konstrukcijų su gumos granulių mėginiais rezonansinis dažnis yra viena oktava aukštesniame dažnyje.

3.11 pav. pateikti 15 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių su gipso kartono plokštėmis (GKFI) garso perdavimo sumažėjimo rezultatai. Remiantis tyrimų rezultatais ir lyginant juos su 3.11 pav. pateiktais rezultatais, nustatyta, kad garso perdavimo sumažėjimo vertės yra didesnės 3–5 dB per visą dažnių juostą. Garso perdavimo sumažėjimo tendencijos išlieka tokios pačios kaip ir atliekant tyrimus su GKB plokštėmis, garso perdavimo sumažėjimo vertės kyla nuo 250 Hz iki rezonansinio dažnio, kuris nustatytas 400–500 Hz dažnių diapazone. Kadangi tarpas tarp plokščių lieka toks pats, tik padidėja plokščių masė, teoriškai rezonansinis dažnis pasislenka žemųjų dažnių link, tačiau pokytis nėra didesnis negu 1/3 oktavos dažnių diapazone. Ties 1250–1600 Hz pasiekiamas rezonansinis dažnis, kuris susidaro tarpe tarp plokščių dėl rezonansinių modų. Lyginant su 3.12 pav. pateiktais duomenimis, rezonansinis dažnis pasislenka link žemesnių dažnių, nes padidėjo konstrukcijos storis. Nuo rezonansinio dažnio garso perdavimo sumažėjimo vertės vėl kyla ir pasiekia didžiausias vertės iki 65 dB. Vertinant skirtingų konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertes, išlieka ta pati tendencija – geriau garsą izoliuoja tos konstrukcijos, kurias sudaro didesnio tankio gumos granulių plokštės 4, 5, 15. Taip pat išlieka ta pati tendencija, jog geriau veikia tos konstrukcijos, kurių gumos granulių plokštes sudaro dvi arba viena gumos granulių frakcija.



3.11 pav. 15 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių su gipso kartono plokštėmis (GKFI) garso perdavimo sumažėjimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1–5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6–10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11–15 gumos granulių plokštėmis

Fig. 3.11. Sound transmission loss results of 15 ± 2 mm thick rubber granule samples with gypsum board (GKFI) samples: a) – construction with 1–5 rubber granule panel; b – construction with 6–10 rubber granule panel; c – construction with 11–15 rubber granule panel



3.12 pav. 25 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių su gipso kartono plokštėmis (GKB) garso perdavimo sumažėjimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1–5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6–10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11–15 gumos granulių plokštėmis

Fig. 3.12. Sound transmission loss results of 25 ± 2 mm thick rubber granule samples with gypsum board (GKB) samples. (a) – construction with 1–5 rubber granule panels; (b) – construction with 6–10 rubber granule panels; (c) – construction with 11–15 rubber granule panels

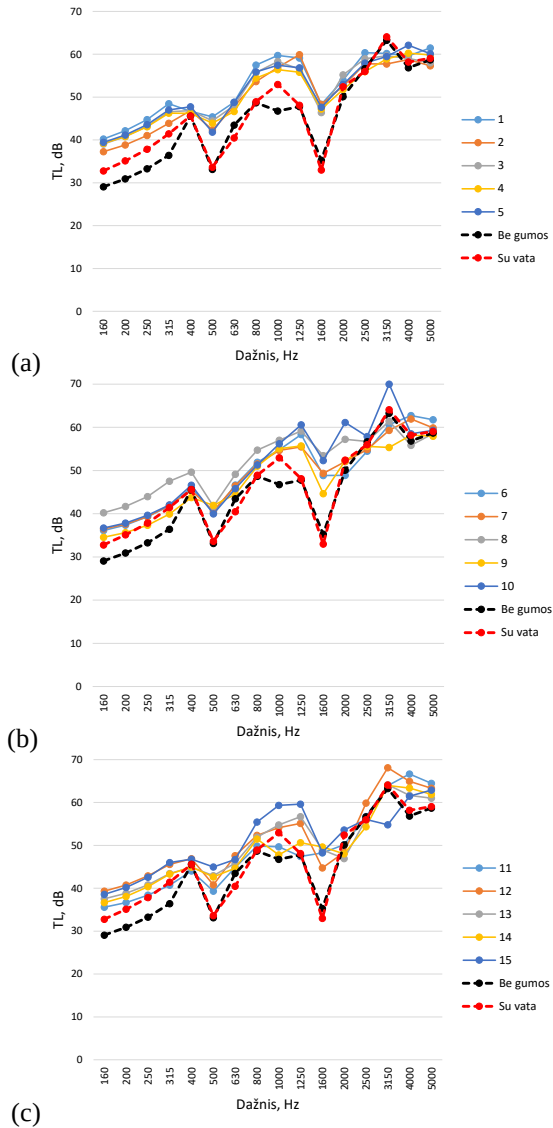
Rezultatai rodo, kad 5, 15 plokštės, kurias sudaro tik vienos frakcijos gumos granulės, veikia geriausiai, o 6–10 plokščių, kurias sudaro iš viso trys gumos granulių frakcijos, sumaišytos skirtingomis proporcijomis, garso sumažėjimo vertės buvo blogesnės.

Atlikus konstrukcijų su GKFI plokštėmis tyrimus, kur tarpas buvo užpildytas mineraline vata arba paliktas tuščias, buvo nustatyti aiškesni rezonansai, lyginant su konstrukcijomis, kai buvo naudojamos mažesnio tankio gipso kartono plokštės (GKB). Tačiau nustatyta ta pati tendencija, kad dėl didesnės bendros konstrukcijos masės konstrukcijų su gumos granulėmis garso izoliacija yra aukštesnė visu dažnių diapazonu. Garso izoliacija, esant rezonansiniams dažniams, tiek žemuosiuose dažniuose (400–500 Hz), tiek aukštuosiuose (1250–1600 Hz) yra aukštesnė iki 15 dB. Tai reiškia, kad guma dėl savo dinaminių savybių geriau slopina garsą esant rezonansiniams dažniams.

3.12 pav. pateikti garso perdavimo sumažėjimo tyrimo rezultatai, tiriant 25 ± 2 mm gumos granulių mėginių su 12,5 mm storio gipso kartono plokštėmis (GKB) iš abiejų pusių. Bendras konstrukcijos storis – 50 ± 2 mm. Tiriant konstrukciją su storesniais gumos granulių mėginiais, esant žemesiems dažniams, vertės kyla pagal masės dėsnį iki rezonansinio dažnio. Lyginant konstrukcijas su 15 mm gumos mėginiais, aiškiai pastebima, kad rezonansinis dažnis šiuo atveju yra ryškesnis ir pasiekiamas esant 500 Hz. Nuo rezonansinio dažnio vertės kyla pagal masės dėsnį ir kitą modalinį rezonansą, kuris nustatytas esant 2000–2500 Hz dažniui. Vėliau vertės toliau kyla ir pasiekia 56–69 dB. Vertinant skirtingų konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertes, nustatyta, jog, esant žemesiems dažniams, garsą geriau izoliuoja konstrukcijos su didesnio tankio ($>730 \text{ kg/m}^3$) gumos granulių mėginiais (3, 6, 15), tačiau šie mėginiai turi ir ryškesnius rezonansinius dažnius. Taip pat nustatyta, jog, didinant visos konstrukcijos masę, garso perdavimo sumažėjimo vertės kyla per visą dažnių juostą, o padidėjus tarpui tarp plokščių, rezonansinis dažnis pasislenka žemesniųjų dažnių link. Lyginant konstrukcijas su 15 ir 25 mm storio mėginiais, garso perdavimo sumažėjimo vertės su 25 mm mėginiais yra vidutiniškai 4 dB geresnės negu su 15 mm mėginiais. Tokios pat tendencijos nustatytos ir kitų mokslininkų tyrimuose.

Lyginant tyrimų rezultatus su konstrukcijomis, kai tarpas užpildytas mineraline vata arba paliekamas tuščias, nustatyta, jog konstrukcijų su gumos mėginiais rezonansiniai dažniai nėra tokie aiškūs. Tai reiškia, jog guma dėl savo savybių geriau slopina vidinius konstrukcijos virpesius. Visais atvejais nustatyta, jog garso izoliacija, kai tarpas užpildytas gumos mėginiais, yra aukštesnė iki 10 dB priklausomai nuo gumos mėginio sudėties.

3.13 pav. pateikti 25 ± 2 mm gumos granulių mėginių su 12,5 mm storio gipso kartono plokštėmis (GKFI) iš abiejų pusių garso perdavimo sumažėjimo tyrimo rezultatai. Konstrukcijos bendras storis yra 55 ± 2 mm.



3.13 pav. 25 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių su gipso kartono plokštėmis (GKFI) garso perdavimo sumažėjimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1–5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6–10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11–15 gumos granulių plokštėmis

Fig. 3.13. Sound transmission loss results of 25 ± 2 mm thick rubber granule samples with gypsum board (GKFI) samples. (a) – construction with 1-5 rubber granule panels; (b) – construction with 6-10 rubber granule panels; (c) – construction with 11-15 rubber granule panels

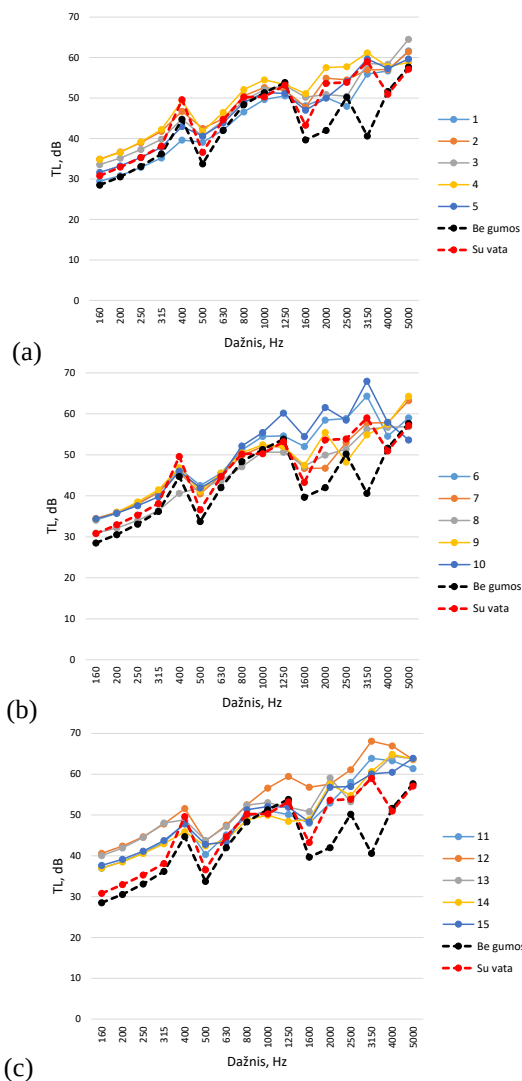
Atlikus tyrimus nustatyta, jog esant žemesiems dažniams vertės kyla pagal masės dėsnį iki rezonansinio dažnio. Lyginant konstrukcijas su 15 mm gumos mėginiais, rezonansinis dažnis yra ryškesnis ir pasiekiamas esant 500 Hz. Už rezonansinio dažnio vertės kyla 8 dB per oktavą pagal masės dėsnį iki kito rezonansinio dažnio, kuris priklauso nuo tarpo tarp plokščių. Antrasis rezonansinis dažnis nustatytas ties 1600–2000 Hz. Toliau vertės kyla ir pasiekia 57–69 dB. Vertinant skirtingų konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertes, nustatyta, jog esant žemesiems dažniams geriau garsą izoliuoja konstrukcijos su didesnio tankio ($>730 \text{ kg/m}^3$) gumos granulių mėginiais (10, 11, 12), tačiau šie mėginiai turi ir aiškesnius rezonansinius dažnius. Remiantis gautais rezultatais matoma, jog, didinant visos konstrukcijos masę, garso perdavimo sumažėjimo vertės kyla per visą dažnių juostą, o padidėjus tarpui tarp plokščių, rezonansinis dažnis pasislenka link žemesniųjų.

Lyginant konstrukcijas su 15 ir 25 mm storio mėginiais, garso perdavimo sumažėjimo vertės su 25 mm mėginiais yra vidutiniškai 2 dB geresnės negu su 15 mm mėginiais.

Atlikus tyrimus, kai oro tarpas užpildomas mineraline vata arba oro tarpas paliekamas tuščias, buvo nustatyti aiškūs rezonansai esant 500 ir 2000 Hz dažniams. Konstrukcijų su gumos granulių mėginiais garso izoliacija, esant rezonansiniams dažniams, yra aukštesnė iki 15 dB, nors yra esant tiems pat dažniams, nes guma geriau slopina vidinius virpesius konstrukcijose.

3.14 pav. pateikti garso perdavimo sumažėjimo tyrimo rezultatai, tiriant 50 ± 2 mm gumos granulių mėginių su 12,5 mm storio gipso kartono plokštėmis (GKB) iš abiejų pusių. Bendras konstrukcijos storis – 75 ± 2 mm. Atlikus tyrimus su 50 ± 2 mm gumos granulių mėginiais esant žemesiems dažniams, vertės kyla pagal masės dėsnį iki rezonansinio dažnio, kaip ir tiriant visas kitas konstrukcijas. Lyginant konstrukcijas su 15 ir 25 mm gumos mėginiais, pastebima, jog rezonansinis dažnis šiuo atveju yra ryškus ir pasiekiamas esant 500 Hz. Nuo rezonansinio dažnio vertės kyla pagal masės dėsnį 8 dB per oktavą iki 1600–2000 Hz, kur tarp dviejų plokščių atsiranda rezonansinės modos. Didinant tarpą tarp plokščių, naudojant storesnį gumos mėginį, šios modos slenkasi link žemesniųjų dažnių. Ties 4000 Hz atsiranda antra rezonansinė moda ir vertės vėl sumažėja. Vertinant garso perdavimo sumažėjimą, vertės kyla per visą oktavos dažnių juostą. Geriausios vertės pasiekiamos esant aukštiesiems dažniams – vertės siekia 57–64 dB. Geriausiai šiuo atveju garsą izoliuoja konstrukcijos su 10, 12 ir 13 gumos mėginiais, kurių dinaminis standumas yra mažesnis ($<9,5 \text{ MN/m}^3$).

Lyginant konstrukcijas su 15 mm, 25 mm ir 50 mm storio mėginiais, garso perdavimo sumažėjimo vertės, esant 50 mm mėginiams, yra vidutiniškai 1,5 dB geresnės negu konstrukcijos su 25 mm mėginiais ir 5,5 dB geresnės už konstrukcijas su 15 mm gumos granulių mėginiais.



3.14 pav. 50 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių su gipso kartono plokštėmis (GKB) garso perdavimo sumažėjimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1–5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6–10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11–15 gumos granulių plokštėmis

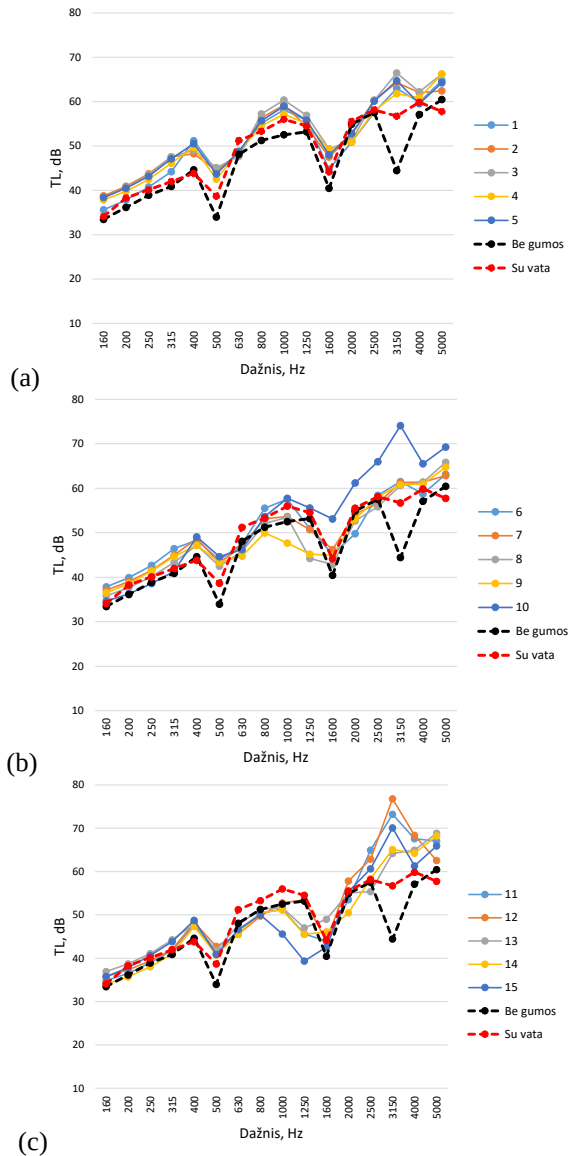
Fig. 3.14. Sound transmission loss results of 50 ± 2 mm thick rubber granule samples with gypsum board (GKB) samples: a – construction with 1–5 rubber granule panels; b – construction with 6–10 rubber granule panels; c – construction with 11–15 rubber granule panels

Lyginant konstrukcijų su gumos granulėmis garso perdavimo sumažėjimo rezultatus su konstrukcijomis, kurių tarpas paliekamas tuščias arba užpildomas mineraline vata, nustatytos tos pačios tendencijos, kaip ir tiriant plonesnes konstrukcijas. Oro tarpą užpildant gumos granulių plokštėmis, dėl gumos dinaminių savybių ir gebėjimo geriau slopinti virpesius garso izoliacija yra geresnė esant rezonansiniams dažniams. Visais atvejais konstrukcijų su guma rezonansai yra ne tokie ryškūs, lyginant su konstrukcijomis, kurių tarpas yra tuščias arba užpildytas mineraline vata.

3.15 pav. pateikti garso perdavimo sumažėjimo tyrimo rezultatai, tiriant 50 ± 2 mm gumos granulių mėginius su 15 mm storio gipso kartono plokštėmis (GKFI) iš abiejų pusių. Konstrukcijos bendras storis – 80 ± 2 mm. Atlikus tyrimus su 50 ± 2 mm iki rezonansinio dažnio esant 500 Hz, garso perdavimo sumažėjimo vertės kyla pagal masės dėsnį. Garso perdavimo sumažėjimo vertės esant rezonansiniam dažniui sumažėja 4–6 dB. Nuo rezonansinio dažnio vertės kyla pagal masės dėsnį 8 dB per oktavą iki 1250–1600 Hz, kur tarp dviejų plokščių atsiranda rezonansinės modos. Taip pat nustatyta, jog, padidinus konstrukcijos storį, rezonansas pasislenka link žemesniųjų dažnių. Kai yra 4000 Hz, atsiranda antra rezonansinė moda ir vertės vėl sumažėja 2–4 dB. Vertinant garso perdavimo sumažėjimą, vertės kyla per visą oktavos dažnių juostą. Geriausios vertės pasiekiamos esant aukštiesiems dažniams, vertės siekia 62–69 dB. Geriausiai šiuo atveju garsą izoluoja konstrukcijos su 10, 11 ir 12 gumos mėginiais, kurių dinaminis standumas yra mažesnis ($<9,5 \text{ MN/m}^3$).

Lyginant konstrukcijas su 15 mm, 25 mm ir 50 mm storio mėginiais, garso perdavimo sumažėjimo vertės su 50 mm mėginiais yra vidutiniškai 3 dB geresnės negu konstrukcijos su 25 mm mėginiais ir 5 dB geresnės už konstrukcijas su 15 mm gumos granulių mėginiais.

Atlikus tyrimus, kai oro tarpas užpildomas mineraline vata arba oro tarpas paliekamas tuščias, buvo nustatyti aiškūs rezonansai esant 500 ir 2000 Hz ir 3150 Hz. Konstrukcijų su gumos granulių mėginiais garso izoliacija esant rezonansiniams dažniams yra aukštesnė iki 10 dB. Šiuo atveju taip pat nustatyta, kad konstrukcijų su gumos granulių plokštėmis rezonansinis dažnis esant aukštiesiems dažniams pasislenka per vieną oktavą ir yra apie 4000 Hz, o konstrukcijos, kurių tarpas tuščias arba užpildomas mineraline vata, rezonansinis dažnis yra ties 3150 Hz.



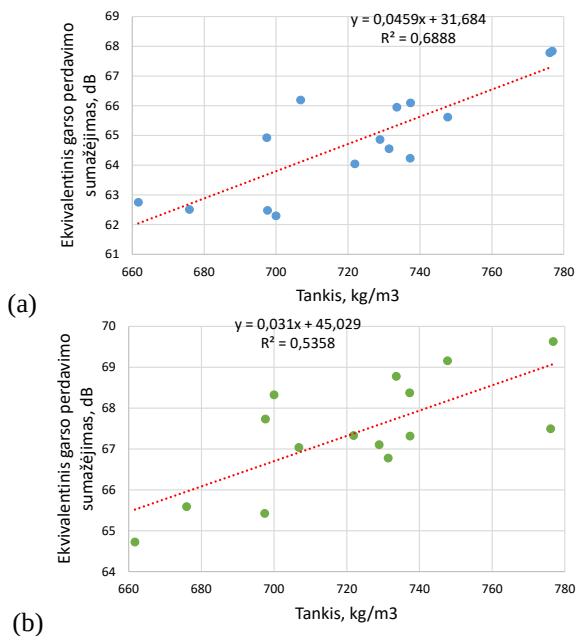
3.15 pav. 50 ± 2 mm storio gumos granulių mėginių su gipso kartono plokštėmis (GKFI) garso perdavimo sumažėjimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1-5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6-10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11-15 gumos granulių plokštėmis

Fig. 3.15. Sound transmission loss results of 50 ± 2 mm thick rubber granule samples with gypsum board (GKFI) samples: a – construction with 1-5 rubber granule panels; b – construction with 6-10 rubber granule panels; c – construction with 11-15 rubber granule panels

3.3 lentelė Ekvivalentiniai garso perdavimo sumažėjimo rezultatai**Table 3.3.** Results of equivalent transmission loss

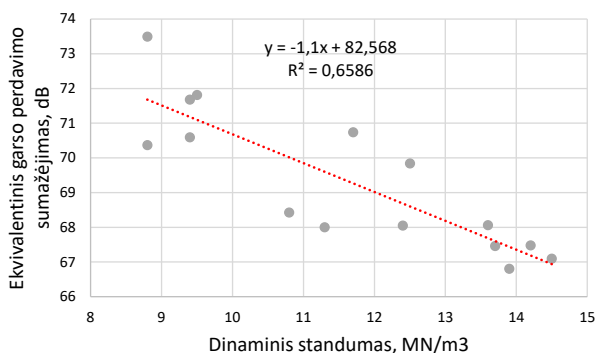
Mėginio Nr.	Konstrukcija					
	15 mm GKB	25 mm GKB	50 mm GKB	15 mm GKFI	25 mm GKFI	50 mm GKFI
	Ekvivalentinis garso perdavimo sumažėjimas, dB					
1	64,1	64,3	64,5	67,6	68,7	69,2
2	61,2	63,8	65,6	66,9	66,6	69,6
3	62,2	67,0	67,1	66,5	67,2	71,5
4	64,5	69,1	66,8	69,7	66,7	69,6
5	64,9	66,5	65,1	69,5	67,9	69,8
6	65,1	66,5	68,0	66,9	68,0	68,0
7	60,2	63,7	66,1	64,0	66,9	67,9
8	62,8	69,1	63,0	65,3	67,5	68,8
9	58,3	62,9	66,6	64,9	64,9	68,2
10	62,3	68,3	70,5	67,9	71,9	76,5
11	60,2	64,2	68,7	63,7	70,4	75,5
12	63,1	68,4	72,5	67,2	71,4	77,8
13	60,0	65,9	69,1	66,1	68,4	71,7
14	61,3	66,8	69,0	63,4	68,5	71,4
15	62,8	64,4	68,0	65,8	68,3	72,4
Vidurkis	62,2	66,1	67,4	66,4	68,3	71,2

Vertinant konstrukcijų su gumos granulių plokštėmis garso perdavimo sumažėjimą priklausomai nuo tankio buvo nustatyta, kad garso perdavimo sumažėjimo vertės didėja didinant gumos mėginio tankį. Iš 3.16 pav. nustatyta, jog konstrukcijoje naudojant 15 ir 25 mm storio gumos granulių mėginius yra tiesinė priklausomybė, determinacijos koeficientai (R^2) atitinkamai lygūs 0,689 ($p = 0,000129$) ir 0,536 ($p = 0,00192$), o konstrukcijų su 50 mm storio gumos mėginių determinacijos koeficientas $R^2 < 0,25$, $p = 0,342$. Todėl, analizuojant rezultatus pagal regresinės kreivės formulę, galima teigti, jog konstrukcijose su 15 ir 25 mm gumos mėginiais, didinant gumos mėginio tankį 30 kg/m^3 , garso perdavimo sumažėjimo vertės abiem atvejais didėja 1,3 dB ir 1,0 dB.



3.16 pav. Ekvivalentinio garso perdavimo sumažėjimo rezultato priklausomybė nuo gumos plokštės tankio: a – konstrukcijos su 15 mm gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 25 mm gumos granulių plokštėmis

Fig. 3.16. Dependence of the equivalent sound transmission loss results in the density of the rubber granule board: a – construction with 15 mm rubber granule panel; b – construction with 25 mm rubber granule panel



3.17 pav. Ekvivalentinio garso perdavimo sumažėjimo rezultato priklausomybė nuo gumos mėginio dinaminio standumo. Konstrukcijos su 50 mm gumos granulių plokštėmis

Fig. 3.17. Dependence of the equivalent sound transmission loss results in the dynamic stiffness of the rubber granule board. Constructions with 50 mm rubber granule panel

Analizuojant garso perdavimo sumažėjimą priklausomai nuo dinaminio standumo (3.17 pav.), buvo nustatyta, jog nėra tiesinės priklausomybės tarp dinaminio standumo ir garso perdavimo sumažėjimo tiriant konstrukciją su 15 mm ir 25 mm storio gumos granulių plokštėmis, determinacijos koeficientas $R^2 < 0,25$, $p > 0,05$. Konstrukcijose su 50 mm storio gumos granulių plokšte tiesinė priklausomybė buvo nustatyta, kai determinacijos koeficientas (R^2) siekia 0,659, $p = 0,000240$. Didinant gumos granulių plokštės dinaminį standumą 2 MN/m^3 , garso perdavimo sumažėjimo vertės konstrukcijose su 50 mm storio gumos granulių plokšte sumažėja 2,2 dB.

3.2.3. Rezultatų apibendrinimas ir diskusija

Analizuojant garso perdavimo sumažėjimo vertes priklausomai nuo gumos granulių plokštės fizinių savybių, nustatyta, jog konstrukcijos su ploniausiais 15 ir 25 mm storio gumos granulių mėginiais geriau izoluoja garsą, kai plokštės tankis yra didesnis, tačiau nepriklauso nuo plokštės dinaminio standumo. Konstrukcijoje naudojant 50 mm storio gumos granulių plokštę, nėra tiesioginės priklausomybės nuo tankio, tačiau garso perdavimo sumažėjimas stipriai priklauso nuo plokštės dinaminio standumo.

Todėl galima daryti išvadą, jog konstrukcijose su 15 mm ir 25 mm gumos granulių mėginiais optimalu naudoti tas plokštes, į kurių sudėtį įtraukta daugiau smulkiosios frakcijos gumos granulių. Didinant gumos mėginį iki 50 mm, optimalu naudoti gumos granulių plokštes, į kurių sudėtį įtraukta mažiau stambiosios frakcijos gumos granulių.

Bendrai vertinant konstrukcijų garso perdavimo sumažėjimo vertes, nustatyta, kad konstrukcijų su 15 mm ir 25 mm storio gumos mėginiais garso izoliacija priklauso nuo bendros konstrukcijos masės. Naudojant 15 mm ir 25 mm storio gumos granulių plokštes konstrukcijose, jų garso perdavimo sumažėjimo vertės yra artimesnės viengubų konstrukcijų garso izoliacijai. Tai patvirtina ir matavimo rezultatai 1/3 oktavos dažnių juostoje, kur garso perdavimo sumažėjimo vertės iki rezonansinio dažnio kyla palaipsniui pagal masės dėsnį, kas būdinga viengubų konstrukcijų garso izoliacijai, o masės–oro–masės rezonansas yra neryškus. Konstrukcijų su 50 mm storio gumos granulių plokštėmis garso perdavimo sumažėjimo vertės priklauso nuo gumos mėginio dinaminio standumo – kuo jis mažesnis, tuo garso perdavimo sumažėjimo vertės aukštesnės. Tai leidžia teigti, jog guma veikia kaip tarpinė tarp dviejų gipso kartono plokščių ir sudaro dvigubą garsą izoliuojančią konstrukciją. Tai patvirtini faktas, jog 1/3 oktavos dažnių juostoje atsiranda aiškus masės–oro–masės rezonansas, kuris būdingas dvigubų konstrukcijų garso izoliacijai. Tokios tendencijos atitinka ir kitų mokslininkų darbuose atliktą analizę (Long, 2014; Deng et al., 2021; Kosała, 2019).

3.3. Eksperimentiniai garso įneštinio silpninimo tyrimai

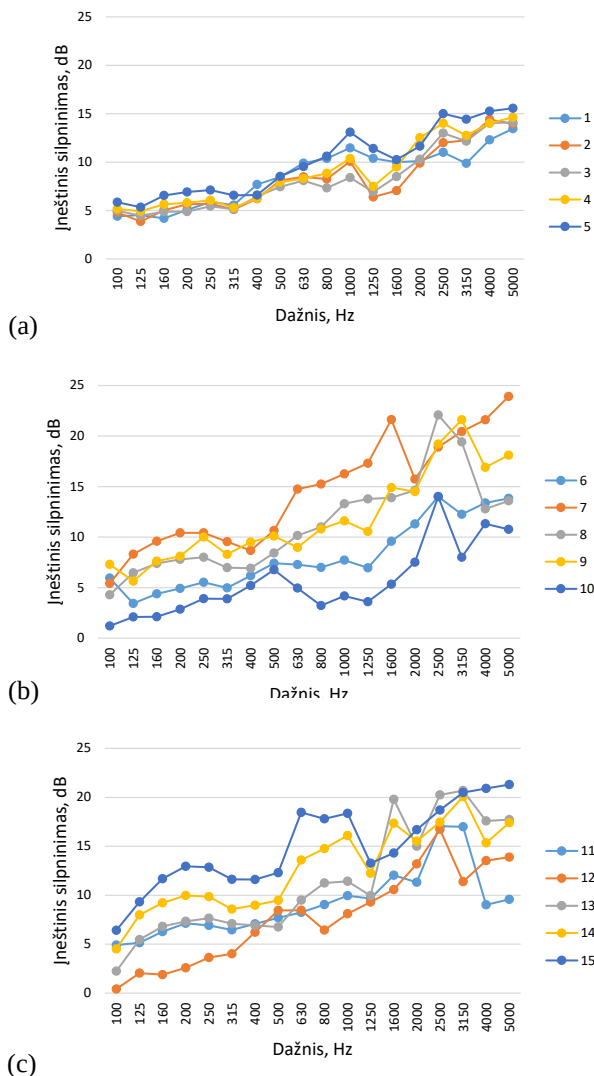
Triukšmo slopinimo kameroje specialiai sukurtame stende buvo išmatuotas gumos granulių plokščių garso įneštinis silpninimas. Atliekant tyrimus buvo išmatuotas kiekvienos gumos granulių plokštės garso įneštinis silpninimas. Taip pat atliekamas gumos granulių plokštės tyrimas, sudarant dviejų arba trijų sluoksnių konstrukciją, naudojant dvi skirtingas gipso kartono plokštes – įprasto tankio gipso kartono plokštę GKB (tankis $680 \pm 10 \text{ kg/m}^3$) ir didesnio tankio gipso kartono plokštę GKFI (tankis $1020 \pm 10 \text{ kg/m}^3$). Buvo ištirtos keturios skirtingos konstrukcijos:

- $15 \pm 2 \text{ mm}$ gumos granulių plokštė su gipso kartono plokšte GKB;
- $15 \pm 2 \text{ mm}$ gumos granulių plokštė su gipso kartono plokšte GKB iš abiejų pusių;
- $15 \pm 2 \text{ mm}$ gumos granulių plokštė su gipso kartono plokšte GKFI;
- $15 \pm 2 \text{ mm}$ gumos granulių plokštė su gipso kartono plokšte GKFI iš abiejų pusių.

Lyginant skirtingų gumos granulių plokščių garso įneštinio silpninimo rezultatus, 3.18 pav. nustatyta, jog esant žemesiems dažniams plokštės, kurių tankis yra didesnis, pasižymi geresniais įneštinio silpninimo rezultatais. Įneštinio silpninimo rezultatai, tiriant gumos granulių plokštes, didėja per visą dažnių juostą pagal masės dėsnį. Remiantis teorija, įneštinio silpninimo rezultatai kyla 6 dB per oktavą. Atlikus eksperimentinius tyrimus, buvo nustatytos panašios tendencijos. Esant aukštiesiems 2000–4000 Hz dažniams, nustatytas kritinis dažnis. Tačiau jis nėra aiškiai išreikštas, nes gumos granulių plokštė nėra vienalytė medžiaga ir jos dinaminės savybės skiriasi nuo standžių plokščių. Dėl šios priežasties esant aukštiesiems dažniams nustatomi didesni skirtumai tarp plokščių garso izoliacijos. Nustatyta tendencija, kad plokštės, kuriose yra mažesnis kiekis stambiosios frakcijos, yra homogeniškesnės ir sandaresnės, todėl jų įneštinio silpninimo rezultatai yra geresni. Plokštės, kuriose yra daugiau stambiosios frakcijos, 12, 13, 14, 15 vertės labai stipriai išsiskiria.

Už kritinio dažnio plokščių efektyvumas pasiekia pikus. Nustatyta, kad geriausiai garsą izoliuoja tankesnės plokštės, šiuo atveju 8, 15 ir 13, kuriose geriausi rezultatai pasiekiami esant aukštam 5000 Hz dažniui ir vertės siekia 18–25 dB.

Siekiant ištirti, kaip garsą izoliuoja gumos granulių plokštė, sujungta su kieta, garsą izoliuojančia medžiaga, buvo sudaryta konstrukcija su GKB gipso kartono plokšte ir gumos granulių plokšte. Konstrukcijos storis – $26,5 \pm 2 \text{ mm}$ (3.19 pav.).



3.18 pav. Gumos granulių plokščių garso įneštinio silpninimo rezultatai:

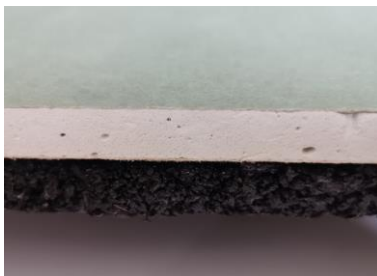
a – 1–5 gumos granulių plokštės; b – 6–10 gumos granulių plokštės;

c – 11–15 gumos granulių plokštės

Fig. 3.18. Insertion loss results of rubber granule panels.

a – 1–5 rubber granule panel; b – 6–10 rubber granule panel;

c – 11–15 rubber granule panel

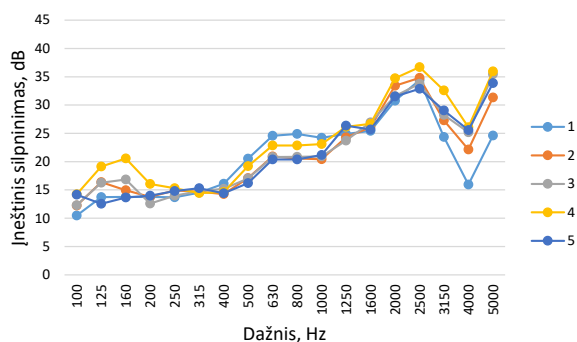


3.19 pav. Gumos granulių ir GKB gipso plokščių konstrukcija

Fig. 3.19. Construction of rubber granules and GKB gypsum panels

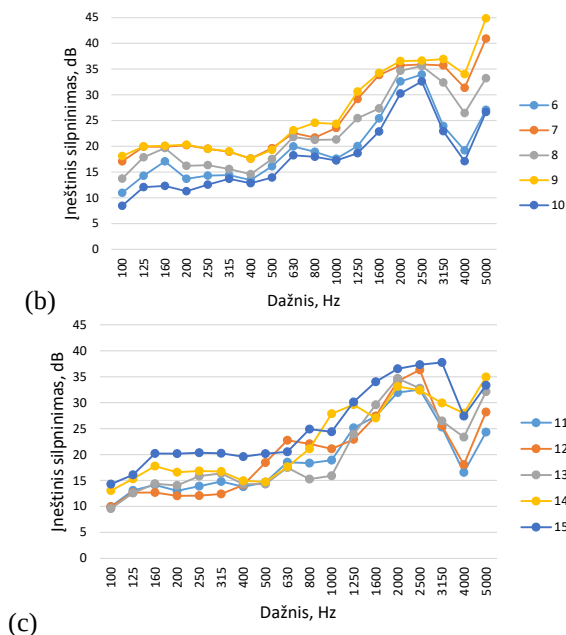
Rezultatai rodo (3.20 pav.), jog esant žemesiems dažniams garso lygis sumažėja 10–15 dB ir vertės palaipsniui kyla pagal masės dėsnį, vidutiniškai apie 4–6 dB per oktavą. Didžiausios įneštinio silpninimo vertės pasiekiamos esant aukštiesiems dažniams – 2000–2500 Hz, o tai yra lygu $\frac{1}{2}$ kritinio dažnio. Vertės esant šioms dažniams siekia 30–37 dB. Kritinis dažnis pasiekiamas esant 4000 Hz ir yra aiškiai išreikštas, šioje vietoje vertės krinta nuo 5 iki 15 dB. Vertinant bendrus rezultatus, nustatyta, jog geriausi rezultatai gaunami tiriant konstrukcijas su didesnio tankio gumos granulių plokštėmis, šiuo atveju geriausiai garsą izoliuoja konstrukcijos su 4, 12, 15 plokštėmis, kurių tankis yra $>730 \text{ kg/m}^3$.

Atlikus tyrimą nustatyta, jog tankesnės gumos granulių plokštės visoje dažnių juostoje garsą sumažina apie 3–4 dB geriau. Pridėjus ar sudarius konstrukciją su papildoma gipso kartono plokšte, garso lygio sumažėjimo vertės, esant aukštiesiems dažniams, padidėja iki 5–15 dB.



(a)

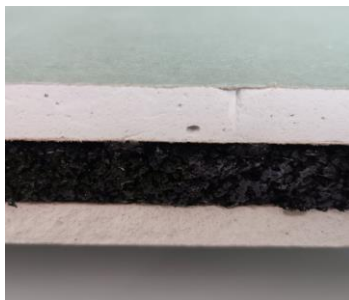
3.20 pav. pabaiga kitame puslapyje



3.20 pav. Gumos granulių plokščių su viena GKP gipso kartono plokšte garso įneštinio silpninimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1–5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6–10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11–15 gumos granulių plokštėmis

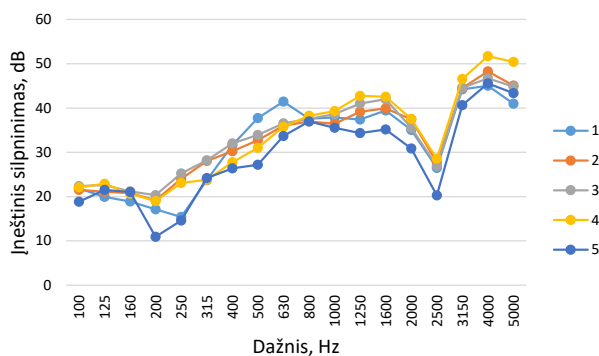
Fig. 3.20. Insertion loss results of rubber granule panels with one GKP gypsum board. (a) – construction with 1–5 rubber granule panels; (b) – construction with 6–10 rubber granule panels; (c) – construction with 11–15 rubber granule panels

Taip pat buvo sudaryta konstrukcija, iš abiejų pusių gumos granulių plokštę sujungus su dviem GKB gipso kartono plokštėmis. Konstrukcijos storis – 39 ± 2 mm (3.21 pav.).

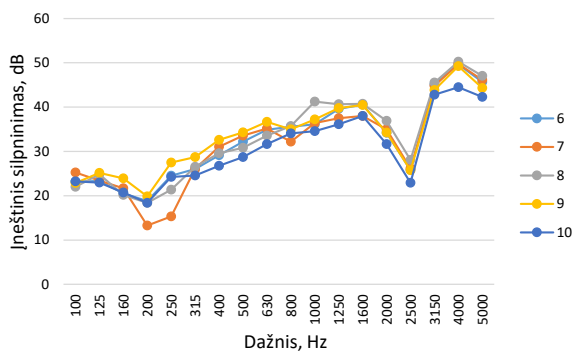


3.21 pav. Gumos granulių ir dviejų GKB gipso plokščių konstrukcija
Fig. 3.21. Construction of rubber granules and two GKB plasterboards

Tyrimais nustatyta (3.22 pav.), jog esant žemesiems dažniams garso lygio sumažėjimas siekia 20–25 dB, o rezonansinis dažnis nustatytas esant 200–250 Hz. Nuo 250 Hz iki pusės kritinio dažnio, kuris lygus 1250 Hz, garso sumažėjimas didėja pagal masės dėsnį ir pasiekia 35–42 dB, o esant 2500 Hz dažniui pasiekiamas kritinis dažnis, kai garso sumažėjimas siekia 20–30 dB. Nuo kritinio dažnio aukštųjų dažnių juostoje garso izoliacijos vertės didėja, o pikus pasiekia esant 4000 Hz. Didžiausios vertės siekia 40–55 dB. Tyrimais nustatyta, kad geriau garsą slopina konstrukcijos su didesnio tankio plokštėmis. Plokštės (4, 8, 12, 15), kurių tankis yra didesnis už vidurkį ($>730 \text{ kg/m}^3$), pasižymi geresne garso izoliacija.

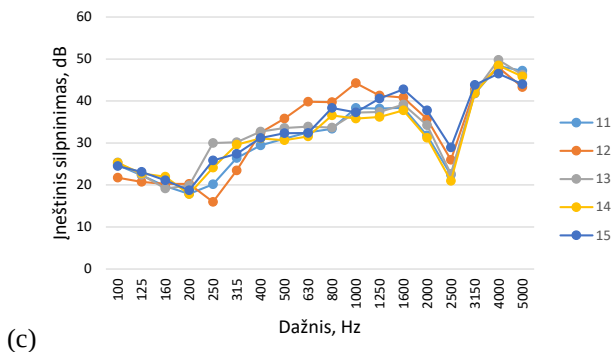


(a)



(b)

3.22 pav. pabaiga kitame puslapyje



(c)

3.22 pav. Gumos granulių plokščių su dviem GKB gipso kartono plokštėmis iš abiejų pusių garso įneštinio silpninimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1–5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6–10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11–15 gumos granulių plokštėmis

Fig. 3.22. Insertion loss results of rubber granule panels with two GKB plasterboards on both sides: a – construction with 1–5 rubber granule panels; b – construction with 6–10 rubber granule panels; c – construction with 11–15 rubber granule panels

Siekiant nustatyti, kaip kinta garso izoliacijos vertės didinant išorinių plokščių tankį, buvo sudaryta konstrukcija su viena GKFI gipso ir gumos granulių plokšte. Konstrukcijos storis – 29 ± 2 mm (3.23 pav.).

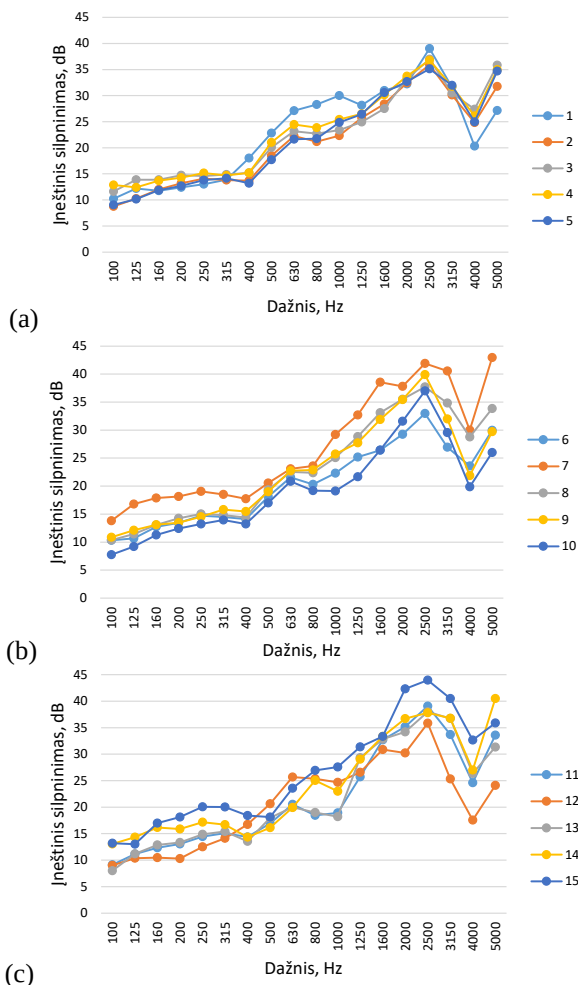


3.23 pav. Gumos granulių ir GKFI gipso plokščių konstrukcija

Fig. 3.23. Construction of rubber granules and GKFI gypsum panels

Tyrimų rezultatai rodo (3.24 pav.), jog esant žemesiems dažniams garso lygis sumažėja 7–17 dB ir tolygiai didėja pagal masės dėsnį iki kritinio konstrukcijos dažnio. Vidutiniškai vertės didėja apie 4–6 dB per oktavą. Didžiausios įneštinio silpninimo vertės nustatytos esant 2000–2500 Hz aukštiesiems dažniams. Aukščiausi garso izoliacijos rezultatai nustatyti su 11, 12,

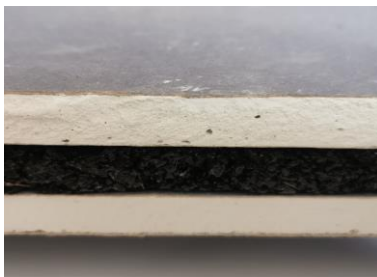
15 gumos granulių plokštėmis, kurių tankis yra didesnis, lyginant su kitomis plokštėmis ($>730 \text{ kg/m}^3$). Esant 4000 Hz, fiksuojamas kritinis dažnis, kur vertės krinta apie 15–20 dB. Lyginant dvi vienodas konstrukcijas su GKB ir GKFI plokštėmis, nustatyta, jog, naudojant didesnio tankio gipso kartono plokštę GKFI, įneštinio silpninimo vertės yra didesnės 3–6 dB.



3.24 pav. Gumos granulių plokščių su viena GKFI gipso kartono plokšte garso įneštinio silpninimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1–5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6–10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11–15 gumos granulių plokštėmis

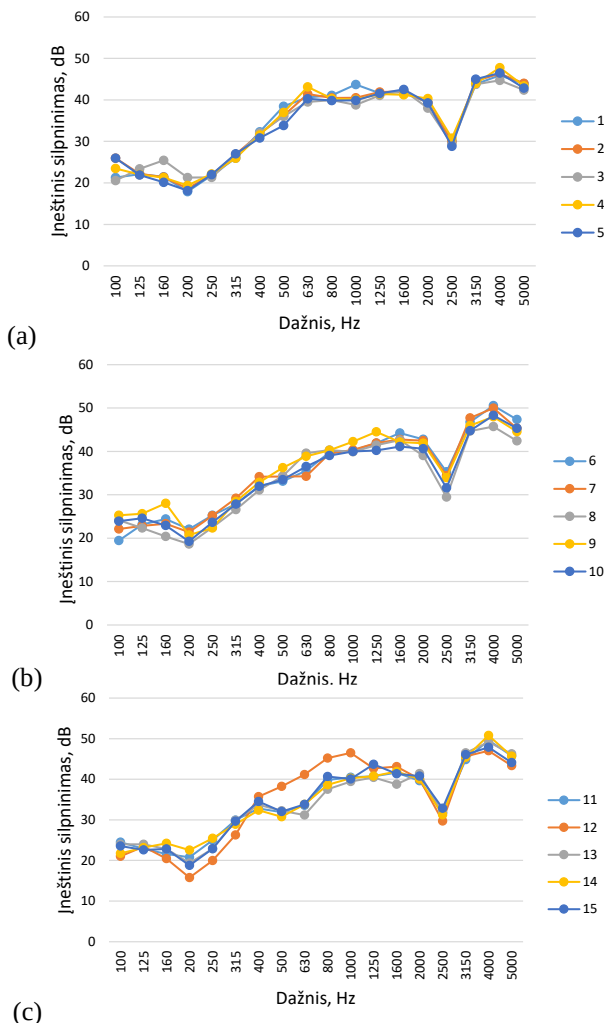
Fig. 3.24. Insertion loss results of rubber granule panels with one GKFI gypsum board. (a) – construction with 1–5 rubber granule panels; (b) – construction with 6–10 rubber granule panels; (c) – construction with 11–15 rubber granule panels

Taip pat buvo sudaryta ir tirta garsą izoliuojanti konstrukcija, kurią sudarė gumos granulių plokštė, iš abiejų pusių sujungta su dviem GKFI gipso kartono plokštėmis. Konstrukcijos storis – 44 ± 2 mm. Konstrukcijai buvo panaudoto didesnio tankio ($>1000 \text{ kg/m}^3$) gipso kartono plokštės, kurios dėl savo didesnės masės geriau izoliuoja triukšmą (3.25 pav.).



3.25 pav. Gumos granulių ir dviejų GKFI gipso plokščių konstrukcija
Fig. 3.25. Construction of rubber granules and two GKFI plasterboards

Tyrimų rezultatai rodo (3.26 pav.), jog esant žemesiems dažniams konstrukcijos garso izoliacijos vertės siekia 20–25 dB, tačiau kai yra 200 Hz, susidaro rezonansinis dažnis ir garso vertės sumažėja iki 15–22 dB. Dėl rezonansinio dažnio garso sumažėjimo vertės didėja vidutinių ir aukštųjų dažnių juostoje iki 1250 Hz, kur rezultatai siekia 38–43 dB, o esant 2500 Hz dažniui, susidaro kritinis dažnis ir rezultatai vėl sumažėja iki 28–35 dB. Dėl kritinio dažnio garso izoliacija didėja, geriausios vertės pasiekiamos esant aukštajam 5000 Hz dažniui. Garso slėgio lygis sumažėja 44–53 dB. Tyrimų rezultatai rodo, jog tokių konstrukcijų garso izoliacija, naudojant skirtingas gumos granulių plokštes, priklauso nuo medžiagos tankio – kuo jis didesnis, tuo labiau garsas sumažėja, tačiau skirtumai nėra labai dideli. Aiškios tendencijos dėl dinaminio standumo nėra, tačiau konstrukcijos su 8, 11, 12, 15 gumos plokštėmis, kurių dinaminis standumas mažesnis už vidurkį, šiek tiek geriau sumažina garsą nei konstrukcijos su didesnio dinaminio standumo gumos granulių plokštėmis. Lyginant konstrukcijas su gipso kartono plokštėmis GKB ir GKFI, nustatyta, jog konstrukcijos su didesnio tankio GKFI plokštėmis garsą izoliuoja vidutiniškai 2–4 dB geriau.



3.26 pav. Gumos granulių plokščių su dviem GKFI gipso kartono plokštėmis iš abiejų pusių garso įneštinio silpninimo rezultatai: a – konstrukcijos su 1–5 gumos granulių plokštėmis; b – konstrukcijos su 6–10 gumos granulių plokštėmis; c – konstrukcijos su 11–15 gumos granulių plokštėmis

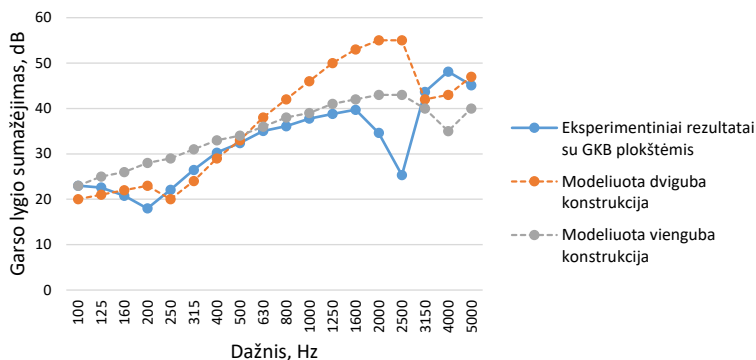
Fig. 3.26. Insertion loss results for rubber bead panels with two GKFI plasterboards on both sides: a – construction with 1–5 rubber granule panels; b – construction with 6–10 rubber granule panels; c – construction with 11–15 rubber granule panels

Eksperimentinių tyrimų metu buvo siekiama ištirti, kaip keičiasi konstrukcijų su skirtingomis gumos plokštėmis įneštinio silpninimo rezultatai. Atlikus tyrimus

buvo nustatyta, jog konstrukcijos su didesnio tankio gumos granulių plokštėmis garsą izoliuoja geriau. Taip pat nustatyta, jog, naudojant didesnio tankio gipso kartono plokštę, garso sumažėjimo vertės padidėja 2–4 dB. Tokios tendencijos visiškai koreliuoja su teoriniais modeliais. Remiantis masės dėsnio, garso izoliacija priklauso nuo konstrukcijos masės. Tačiau papildomai svarbu įvertinti ir medžiagų dinamines savybes. Teorijoje yra išskiriamos viengubos ir dvigubos konstrukcijos. Viengubos konstrukcijos gali susidėti ir iš kelių skirtingų sluoksnių, tačiau pagrindinė tokių konstrukcijų savybė ta, jog jos yra standžiai tarpusavyje sujungtos. Dvigubos konstrukcijos susideda ir dviejų skirtingų sluoksnių, sujungtų tam tikra jungtimi. Todėl viengubų konstrukcijų garso izoliacija priklauso nuo masės dėsnio, o garso izoliacijos vertės teoriškai didėja 6 dB per oktavą. Tačiau kai konstrukcijos storis sutampa su garso bangos ilgiu, susidaro kritinis dažnis, kai garso energija pradeda vibruoti konstrukciją, dėl to atsiranda energijos nuostoliai. Dvigubose konstrukcijose esant žemiesiems dažniams susidaro masės–oro–masės rezonansas, kurio dažnis priklauso nuo tarpo tarp dviejų plokščių ir jį užpildančios terpės tankio. Nuo šio dažnio konstrukcija veikia kaip ir vienguba konstrukcija pagal masės dėsnį, kol esant aukštiesiems dažniams atsiranda kritinis dažnis, priklausantis nuo konstrukcijos plokščių. Vertinant konstrukcijas, taip pat svarbu identifikuoti konstrukcijos tipą. Šiuo atveju sukuriami kelių sluoksnių konstrukcija, kuri veikia kaip vienguba konstrukcija, tačiau dėl mažo dinaminio gumos granulių plokščių standumo dalis energijos prarandama pagal dvigubų konstrukcijų teoriją. Vienguboms konstrukcijoms priskiriami tyrimai, kai buvo tirtos skirtingos gumos granulių plokštės bei konstrukcijos su gumos granulių plokšte ir standžia plokšte iš vienos pusės. Kai konstrukciją sudaro gumos granulių plokštė ir dvi standžios plokštės iš abiejų pusių, esant žemiesiems dažniams ji veikė pagal dvigubos konstrukcijos teoriją, tačiau esant vidutiniams ir aukštiesiems dažniams – pagal viengubos konstrukcijos teoriją.

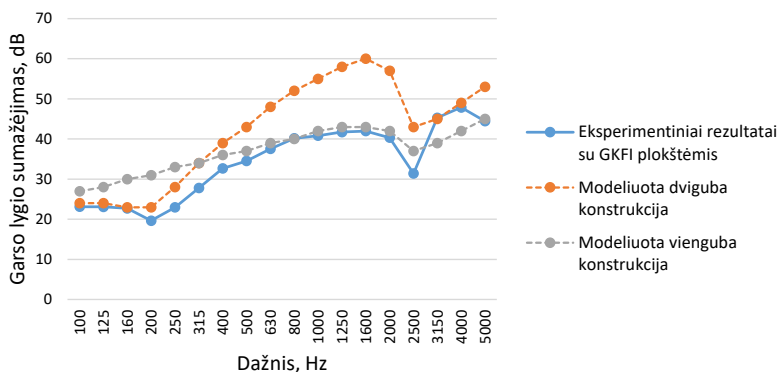
Lyginant trijų skirtingų išmatuotų konstrukcijų, kurias sudarė gumos granulių plokštė ir dvi standžios plokštės iš abiejų pusių, vidutines vertes su modeliavimo rezultatais naudojant INSUL 9.0 programinę įrangą (3.27, 3.28 pav.), nustatyta, jog esant žemiesiems dažniams atsiranda masės–oro–masės rezonansas, kuris priklauso nuo gumos granulių plokštės storio. Pagal teoriją rezonansinis dažnis juda link žemesniųjų dažnių didindamas tarpą tarp dviejų plokščių. Kadangi gumos granulių plokščių storis santyksiškai vienodas 15 ± 2 mm, abiem atvejais su gipso kartono plokštėmis GKB ir GKFI rezonansinis dažnis buvo ties 200–250 Hz ir tai sutampa su dvigubų konstrukcijų modeliavimo rezultatais. Esant vidutiniams ir aukštiesiems dažniams, konstrukcijos garso izoliacijos vertės yra artimos viengubų konstrukcijų modeliavimo rezultatams, ypač vidutinių dažnių juostoje, kuri priklauso nuo konstrukcijos masės. Lyginant su dvigubų konstrukcijų teorija matoma, jog esant vidutiniams dažniams modeliuotos vertės yra gerokai

aukštesnės. Rezonansinis konstrukcijų dažnis šiek tiek skiriasi nuo modeliavimo rezultatų.



3.27 pav. Gumos granulių plokščių su dviem GKB plokštėmis iš abiejų pusių garso įneštinio silpninimo rezultatų palyginimas su teoriniu viengubų ir dvigubų konstrukcijų modeliu

Fig. 3.27. Comparison of insertion loss results of rubber granule panels with two GKB panels on both sides with the theoretical model of single-layer and double-layer constructions



3.28 pav. Gumos granulių plokščių su dviem GKFI iš abiejų pusių garso įneštinio silpninimo rezultatų palyginimas su teoriniu viengubų ir dvigubų konstrukcijų modeliu

Fig. 3.28. Comparison of insertion loss results of rubber granule panels with two GKFI panels on both sides with the theoretical model of single-layer and double-layer constructions

Apibendrinant rezultatus galima teigti, kad konstrukcija su dviem standžiomis plokštėmis (GKB, GKFI) ir gumos granulių plokšte tarp jų veikia kaip vienguba konstrukcija, kurios garso izoliacija daugiausia priklauso nuo visos

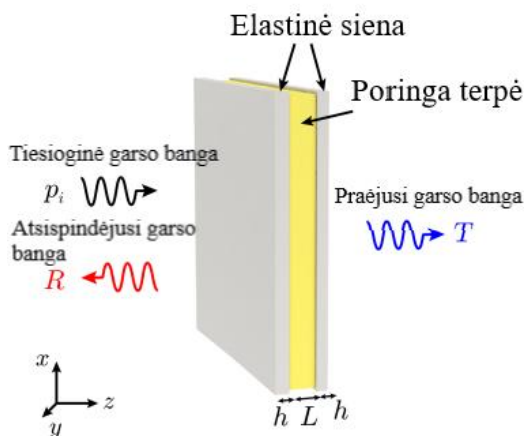
konstrukcijos masės, tačiau esant žemesiems dažniams išmatuotas masės–oro–masės rezonansas leidžia teigti, jog gumos granulių plokštė veikia ir kaip tarpinė, jungianti dvi plokštes. Todėl tokios konstrukcijos gali būti naudojamos įvairiose konstrukcijose, mažinančiose įrenginių skleidžiamą triukšmą, formuojant įvairius barjerus, plonas garsą izoliuojančias konstrukcija ir t. t. Didinant konstrukcijų svorį, galima gauti didesnę garso izoliaciją, o keičiant gumos granulių storį, galima kontroliuoti konstrukcijos rezonansinį dažnį, atsižvelgiant į triukšmo šaltinio garso charakteristikas

3.4. Konstrukcijų su gumos granulių plokštėmis akustinių savybių teoriniai tyrimai

Teoriniu tyrimu, kurio metodika pateikta 2.4.2 skyriuje, sprendžiama garso perdavimo funkcija konstrukcijai, kurią sudaro dvigubos sienos konstrukcija, tarp kurių yra poringoji terpė (3.29 pav.). Remiantis modeliu, poringoji terpė gali būti oras, vanduo ar bet kokia garsui laidži medžiaga. Pagrindinė charakteristika, aprašanti poringąją terpę – akustinė varža. Akustinė varža gali būti išmatuojama interferometru ir apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$\frac{Z}{\rho c_0} = \frac{R}{\rho c_0} + \frac{jX}{\rho c_0} = (1 + r)(1 - r), \quad (3.1)$$

čia R – realioji komponentė; X – tariamoji komponentė; ρc_0 – charakteristinė varža; r – atspindžio koeficientas.



3.29 pav. Teorinio modelio schema
Fig. 3.29. Scheme of the theoretical model

Norint išspręsti teorinio modelio užduotį, gali būti sudaroma perdavimo matrica, kuri aprašoma pagal (3.2) formulę:

$$T = T_w T_f T_w, \quad (3.2)$$

čia T_w – elastinės sienos perdavimo matrica; T_f – poringosios terpės perdavimo matrica.

Išplėsta matrica aprašoma taip (3.3 formulė):

$$T = \begin{bmatrix} 1 & Z_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(k_{0,z}L) & iZ_f \frac{k_0}{k_{0,z}} \sin(k_{0,z}L) \\ \frac{i}{Z_f} \frac{k_{0,z}}{k_0} \sin(k_{0,z}L) & \cos(k_{0,z}L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

čia $k_{0,z}$ – bangos skaičius m^{-1} ; Z_f – poringosios terpės charakteringoji akustinė varža $\text{Pa} \cdot \text{s/m}$; Z_1 ir Z_2 – elastinės sienos akustinė varža ($Z_1 \approx i\omega m'_1$; $Z_2 \approx i\omega m'_2$); m_1 ir m_2 – elastinės sienos svoris, kg/m^2 .

Sprendžiant matricą, gaunama perdavimo koeficiento (3.4) formulė:

$$T = \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_f}\right) \cos(k_0 L) + i \left(1 + \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_f} + \frac{Z_1 Z_2}{2Z_f^2}\right) \sin(k_0 L)}. \quad (3.4)$$

Garso perdavimo vertė gaunama iš perdavimo koeficiento apskaičiuojant pagal (3.5) formulę:

$$TL = -10 \log_{10} |T|^2. \quad (3.5)$$

Interferometru buvo išmatuotos kiekvieno atskiros gumos mėginio (Nr. 1–15) charakteringoji akustinė varža ir bangos skaičius. Šios vertės buvo naudojamos skaičiuojant perdavimo matricą.

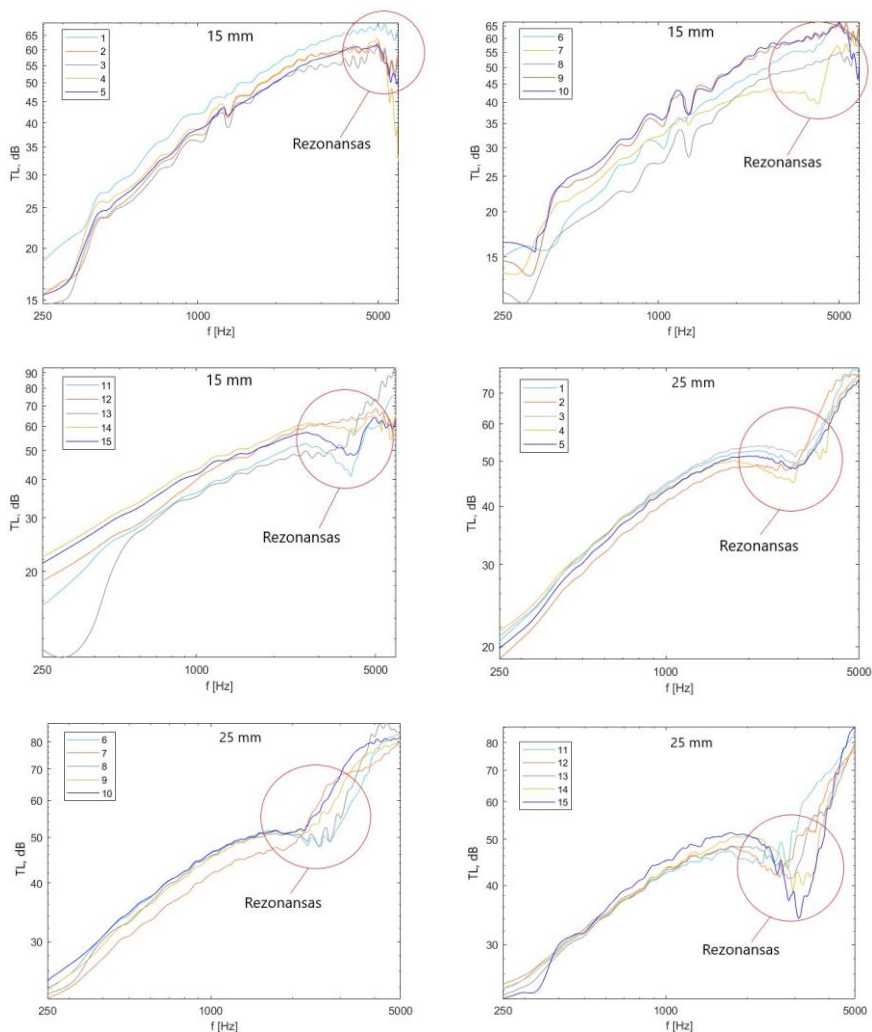
3.30 pav. pateikti garso perdavimo sumažėjimo teorinio skaičiavimo rezultatai, naudojant 12, 25 ir 50 mm storio gumos granuliu mėginius. Teorinio tyrimo metu buvo tariama, jog tarpas tarp dviejų plokščių yra užpildytas gumos granuliu plokšte, kuri slopina bangų sklaidą tarp paralelių plokščių. Oro tarpas tarp dviejų plokščių veikia kaip spyruoklė, todėl esant tam tikram dažniui atsiranda masės–oro–masės rezonansas. Remiantis teorija, masės–oro–masės rezonansas nustatomas pagal (3.6) formulę:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.6\rho_0 c_0^2}{m'd}}, \quad (3.6)$$

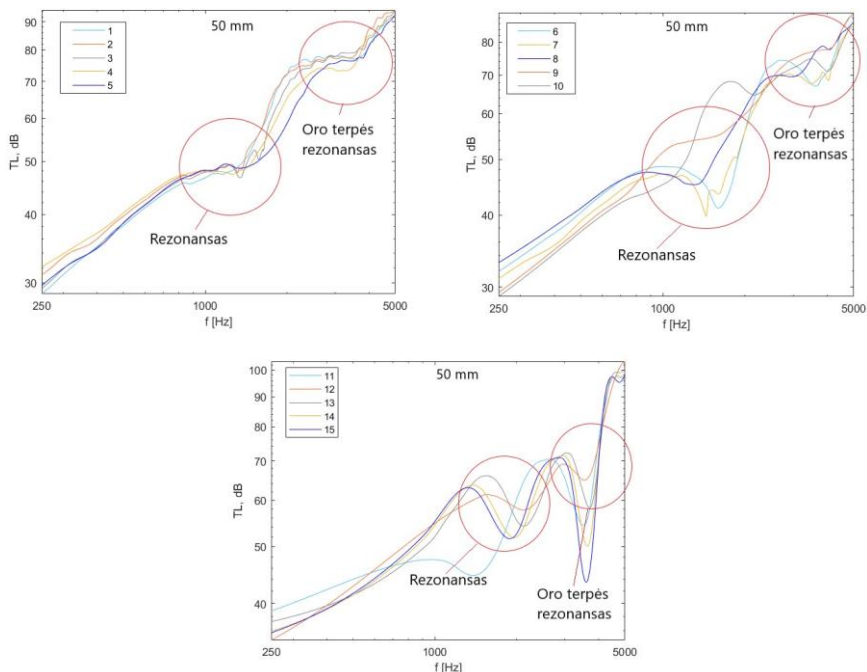
čia $m' = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ konstrukcijos masė ploto vienetui, kg/m^2 ; d – tarpas tarp plokščių, m ; ρ – tankis, kg/m^3 ; c – garso greitis, m/s .

Esant žemiesiems dažniams, žemiau rezonansinio dažnio dvi plokštės veikia kaip viena masė. Konstrukcijos garso izoliacija iki rezonansinio dažnio priklauso

nuo masės dėsni. Esant dažniams, aukštesniems už masės–oro–masės rezonansinį dažnį, terpė tarp dviejų plokščių pradeda veikti bendrą konstrukcijos garso izoliaciją. Nuo masės–oras–masės rezonanso garso perdavimo sumažėjimo vertės reikšmingai išauga, idealus teorinis garso perdavimo pokytis padidėja $6(2N-1)$ dB per oktavą, čia N - oro tarpų tarp plokščių skaičius.



3.30 pav. Pabaiga kitame puslapyje



3.30 pav. Garso perdavimo sumažėjimo teorinio modeliavimo rezultatai pagal perdavimo matricos metodą.

Fig. 3.30. Results of theoretical modelling of sound transmission loss based on the transfer matrix method

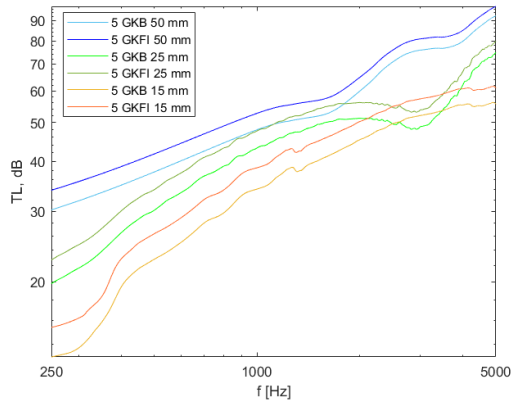
Analizuojant modeliavimo rezultatus su 15 mm storio gumos mėginiais, esant nuo 250 Hz iki 1250 Hz žemesiems dažniams, teoriniu modeliu apskaičiuotos garso perdavimo sumažėjimo vertės kyla pagal masės dėsnį iki masės–oras–masės rezonanso. 15 mm poringosios terpės sluoksnis yra gana plonas, todėl rezonansas nustatomas ties 4000 Hz.

Didinant poringosios terpės sluoksnį iki 25 mm, rezonansinis dažnis mažėja. Konstrukcijose su 25 mm storio gumos granulių mėginiais rezonansinis dažnis nustatomas ties 2500–3000 Hz. Nuo rezonansinio dažnio, kaip ir teorijoje, garso perdavimo sumažėjimo vertės reikšmingai išauga ir didėja apie 18 dB per oktavą.

Padidinus poringosios terpės storį dar dvigubai iki 50 mm, rezonansinis dažnis atsiranda ties 2000 Hz. Tačiau dėl rezonansinių modų atsiranda papildomas rezonansas tarp dviejų plokščių, o tai sukelia daug uždaro terpės rezonansų, kurie apskaičiuojami pagal (3.7) formulę:

$$f_n = \frac{c_0}{2\pi d} \cdot \quad (3.7)$$

Šiuo atveju antras rezonansas atsiranda ties 3500–4000 Hz. Garso izoliacijos vertės iki pirmojo rezonanso kyla vidutiniškai 6 dB per oktavą, o nuo pirmo rezonanso vertės kyla drastiškai ir didėja apie 18 dB per oktavą, kas atitinka teoriją. Su kiekvienu kitu rezonansu vertė didėja dar papildomai 6 dB per oktavą.



3.31 pav. Garso perdavimo sumažėjimo teorinio modeliavimo rezultatų lyginimas su GKB ir GKFI gipso kartono plokštėmis

Fig. 3.31. Comparison of theoretical modeling results of sound transmission loss with GKB and GKFI gypsum plasterboards

3.31 pav. pateiktas garso perdavimo sumažėjimo rezultatų skirtumas naudojant skirtingo tankio gipso kartono plokštes GKB ir GKFI. Teorinio tyrimo rezultatai rodo, jog padidinus konstrukcijos tankį 30 %, kadangi tiek skiriasi GKB ir GKFI plokščių tankis, garso perdavimo rezultatai padidėja apie 5 dB per visą dažnių juostą. Remiantis teorija, šoninių konstrukcijų tankis lemia konstrukcijos garso izoliaciją pagal masės dėsnį. Todėl šiuo atveju, padidinus konstrukcijos storį, garso izoliacijos vertės išauga.

Lyginant teorinio tyrimo rezultatus su eksperimentiniais garso perdavimo sumažėjimo rezultatais, buvo nustatytos vienodos tendencijos. Didinant konstrukcijų storį, rezonansinis dažnis slenkasi link žemesniųjų dažnių. Vertinant ploniausių konstrukcijų su 15 mm gumos granulių plokšte garso perdavimo sumažėjimą, nustatyta, kad rezonansinis dažnis yra tik esant aukštiesiems dažniams ir nėra aiškaus masės–oro–masės rezonanso. Tad galima teigti, jog tokio tipo konstrukcija veikia pagal viengubų konstrukcijų teoriją ir jos garso izoliacija daugiausia priklauso nuo bendro konstrukcijos svorio. Didinant gumos mėginio storį konstrukcijose, rezonansinis dažnis slenkasi žemųjų dažnių link. Nustatyta, kad, lyginant teorinio tyrimo rezultatus su eksperimentiniais tyrimais, konstrukcijų su 15 mm storio gumos granulių mėginiais rezonansinis dažnis skiriasi. Tai yra dėl to, jog metodika skirta dvigubų konstrukcijų garso izoliacijai

modeliuoti, o tyrimų metu buvo nustatyta, jog tokio tipo konstrukcijos veikia kaip vienguba konstrukcija. Konstrukcijų su 25 ir 50 mm storio mėginiais rezonansiniai dažniai sutapo.

3.5. Garsą izoliuojančio gaubto su gumos granulių plokštėmis skaitinio modeliavimo rezultatai, jų analizė

Garsą izoliuojantį gaubtą sudaro šoninės uždarnos sienos ir dvi galinės sienos, kurias sudaro iš dalies atviros konstrukcijos. Galinių sienų konstrukcijos yra sukurtos taip, jog būtų galima keisti jų posvyrio kampą nuo 0 iki 45°. Kampas keičiamas kas 15°.

Triukšmą slopinančioje kameroje buvo atlikti eksperimentiniai akustinių žaliuzių konstrukcijų tyrimai, naudojant skirtingas garsą sugeriančias plokštes. Tyrimai buvo atlikti naudojant polistireninį putplastį, mineralinę vatą ir tris gumos granulių plokštes: Nr. 1, Nr. 6 ir Nr. 11.

3.4 lentelė Ekvivalentinis garso slėgio lygio sumažėjimas ΔL_{Aeq} , dB

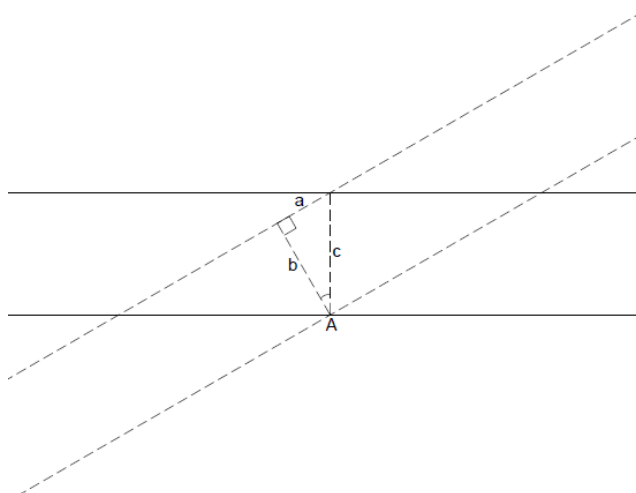
Table 3.4 Equivalent sound pressure level reduction ΔL_{Aeq} , dB

Konstrukcija	Konstrukcijos plokščių posvyrio kampas						
	0°	15° į šaltinį	30° į šaltinį	45° į šaltinį	15° nuo šaltinio	30° nuo šaltinio	45° nuo šaltinio
	Ekvivalentinis garso slėgio lygio sumažėjimas ΔL_{Aeq} , dB						
1	2	3	4	5	6	7	8
Plokštės nepadengtos jokia akustine medžiaga	1,9	3,1	3,5	3,9	2,8	3,2	3,5
Plokštės padengtos gumos granulių plokšte Nr. 1	9,4	10,5	12,2	13,5	10,5	12,2	12,9
Plokštės padengtos gumos granulių plokšte Nr. 6	6,9	8,4	9,3	9,9	7,7	8,8	9,2

3.4 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8
Plokštės padengtos gumos granulių plokšte Nr. 11	8,2	9,6	11,7	11,9	9,3	11,0	11,8
Plokštės padengtos polistireniniu putplasčiu	5,4	5,3	5,3	5,6	6,0	6,8	8,4
Plokštės padengtos mineralinės vatos plokštėmis	10,8	11,6	12,0	12,4	10,8	11,2	11,6

Eksperimentinių tyrimų metu buvo nustatyta, kad konstrukcijos su gumos granulių plokštėmis izoliuoja garsą panašiai kaip ir mineralinės vatos plokštės, todėl gumos granulių plokštės yra tinkamos naudoti žaliuzių konstrukcijoje. Tyrimų metu nustatyta, kad, didinant plokščių posvyrio kampą, įnešinio silpninimo vertės didėja. Visų pirma, didinant plokštės posvyrio kampą, tarpas tarp dviejų plokščių sumažėja (3.32 pav.).



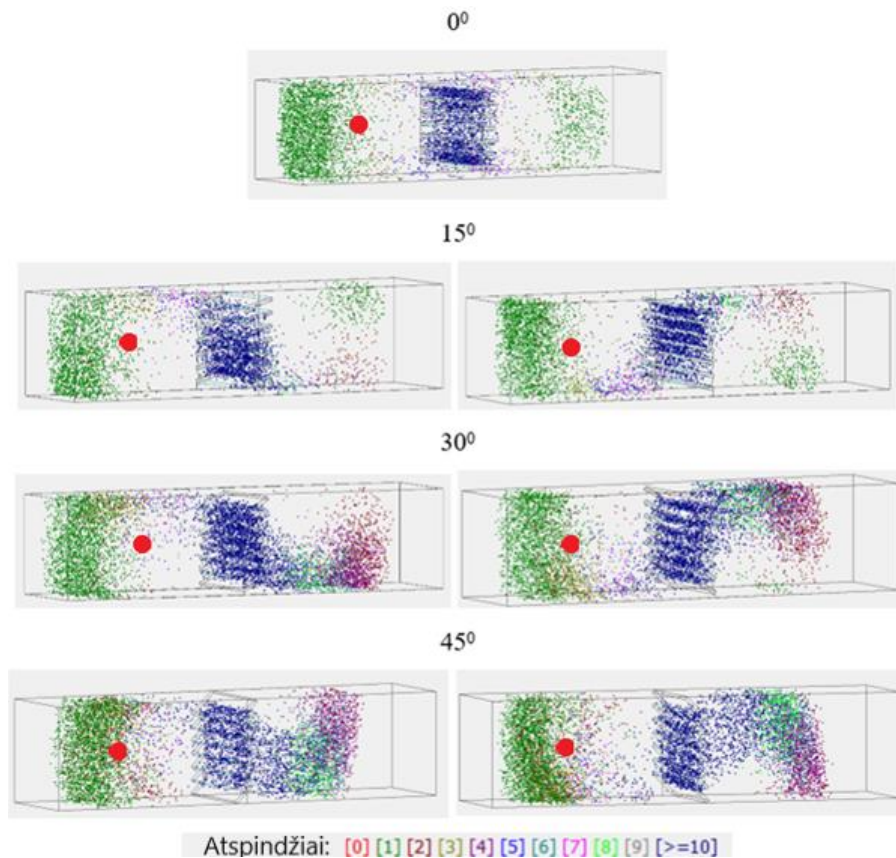
3.32 pav. Tarpo tarp plokščių pokytis, keičiant kampą
Fig. 3.32. Change the gap between the plates by changing the tilt angle of the plates

Tarpo tarp plokščių pokytis gali būti apskaičiuojamas remiantis trigonometrijos formule (3.8):

$$B = c \cdot \cos A, \quad (3.8)$$

čia b – tarpas tarp plokščių; A – plokščių posvyrio kampas.

Siekiant įvertinti įneštinio silpninimo priklausomybę nuo plokščių posvyrio kampo, papildomai buvo atliktas garso spindulių sklaidos modeliavimas.



3.33 pav. Žaliuzių spindulių sklaidimo analizė, kai konstrukcijos plokštės pakreiptos skirtingais kampais

Fig. 3.33. Ray tracing analysis of louvres when plates tilted at different angles

Tai skaičiavimo metodas, leidžiantis numatyti garso spindulių sklaidimo kelius, priklausomai nuo konstrukcijos formos ir medžiagų savybių sugerti ir

atspindėti garsą. Dėl to garso spinduliai gali keisti sklidimo kryptį arba atsispindėti nuo konstrukcijos. Šio tyrimo metu garso sklidimas buvo analizuojamas naudojant „Odeon 16.0 Auditorium“ programinę įrangą. Akustinių žaliuzių principas buvo pagrįstas tuo, kad, keičiant plokščių posvyrio kampą, galima keisti garso bangų sklidimo kryptį, o papildomai panaudojus garsą sugeriančias medžiagas, dalį garso energijos sugerti. Šioje tyrimo dalyje buvo analizuojamas bangų sklidimas per konstrukcines plokštes, keičiant konstrukcinių plokščių posvyrio kampą nuo 0° iki 45° keičiant kampą kas 15° ir pakreipus plokštes į triukšmo šaltinį ir nuo jo.

Spindulių sklidimo analizė rodo (3.33 pav.), kad, plokštelėms esant horizontalioje 0° padėtyje, pagrindinė garso bangų dalis nuo plokštelių atsispindėjo tik vieną kartą. Padidinus plokščių posvyrio kampą iki 15° , nustatyta, kad priklausomai nuo posvyrio krypties galima keisti bangos sklidimo kryptį. Kai posvyrio kampas buvo 15° , didžiausia dalis perduodamų bangų atsispindėjo 1–2 kartus. Plokštės pakreipus 30° kampu, priklausomai nuo plokščių kampo krypties, daugiausia bangų atsispindėjo nuo 2 iki 8 kartų. Kai plokštės buvo pakreiptos 45° , bangos atsispindėjo nuo 4 iki >10 kartų.

Su kiekvienu atspindžiu garso energija mažėja priklausomai nuo medžiagos sugerties savybių. Garso energijos lygis buvo apskaičiuotas kitoje žaliuzių pusėje pagal (3.9) formulę (ISO 3741):

$$L_J = 10 \lg \left(\frac{J}{J_0} \right), \text{ dB} , \quad (3.9)$$

čia J – garso energija, J; J_0 – garso energijos lygio konstanta, J (10^{-12} J).

Pagal šią formulę, sumažinus energijos lygį du kartus, garso lygis sumažėja apie 3 dB, o norint sumažinti garso slėgio lygį 10 dB, energijos lygį reikia sumažinti 10 kartų. Jeigu tam tikru dažniu garso banga praranda 50 % savo energijos, tai reiškia, kad gumos plokštės garso sugertis buvo 0,5, ir su kiekvienu atspindžiu garso lygis gali sumažėti 3 dB, o tai reikštų, kad 10-ąjį atspindį garso lygis sumažinamas maždaug 30 dB.

Garsą mažinančio gaubto skaitinis modeliavimas atliktas su dviejų skirtingų konfigūracijų konstrukcijomis. Pirmiausia buvo sumodeliuotas gaubtas, kurio šoninių sienelių konstrukcija sudaryta iš dviejų 15 mm gipso kartono plokščių (GKFI) ir 25 mm storio gumos granulių plokštės tarp jų (Nr. 10). Galinių sienų plokštės padengtos 25 mm gumos granulių plokšte (Nr. 9). Taip pat buvo atliktas modeliavimas, gumos granulių plokščių storį padidinant iki 50 mm, naudojant gumos granulių plokštę (Nr. 6) galinėms sienelėms, šoninėms sienelėms naudojant konstrukciją, kurią sudarė 15 mm gipso kartono plokštės (GKFI) ir 50 mm storio gumos granulių plokštė (Nr. 12). Galinių sienų plokštės buvo pakreipiamos nuo 0° iki 45° kampu, kampą keičiant kas 15° .

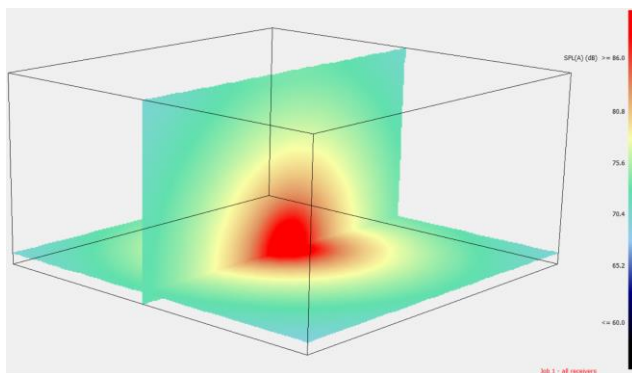
3.5 lentelė Gumos granulių plokščių garso sugerties vertės**Table 3.5.** Sound absorption values of rubber granule panels

	Garso sugerties koeficientas					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
25±2 mm storio gumos granulių plokštė	0,05	0,07	0,13	0,23	0,88	0,40
50±2 mm storio gumos granulių plokštė	0,07	0,13	0,35	0,92	0,52	0,61

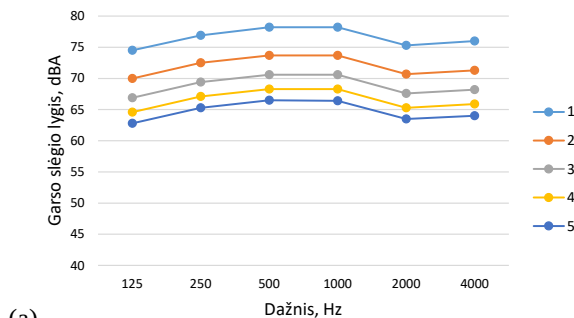
3.6 lentelė. Konstrukcijų su dviem GKFI plokštėmis ir gumos granulių plokšte garso perdavimo sumažėjimo vertės**Table 3.6.** Sound transmission loss values of structures with two GKFI panels and a rubber granule panel

25±2 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų GKFI gipso kartono plokščių								
160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz
34	36	37	39	41	40	46	52	50
1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz			
53	56	52	62	64	63			
50±2 mm gumos granulių plokštė tarp dviejų GKFI gipso kartono plokščių								
160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz
36	37	39	42	48	43	46	50	53
1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz			
53	48	58	62	78	68			

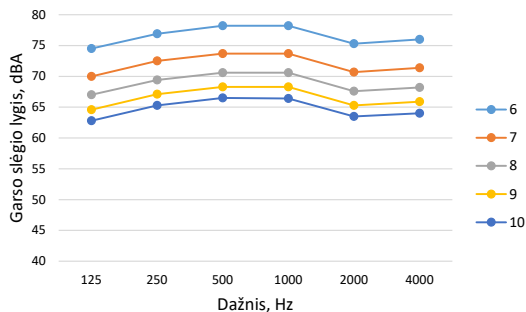
Pirmu modeliavimo etapu buvo atliktas modeliavimas be garsą izoliuojančio gaubto, siekiant nustatyti garso sklaidos vertes.



3.34 pav. Garso slėgio lygiai be garsą izoliuojančio gaubto
Fig. 3.34. Sound pressure levels without a sound-insulating enclosure



(a)



(b)

3.35 pav. Garso slėgio lygiai 1/1 oktavos dažnių juostoje kiekviename priimtovo taške be garsą izoliuojančios konstrukcijos: a – priimtovo taškai X ašyje; b – priimtovo taškai Y ašyje

Fig. 3.35. Sound pressure levels in a 1/1 octave frequency band at each receiver point without a sound-insulating enclosure: a – receiver points on the X-axis; b – receiver points on the Y-axis

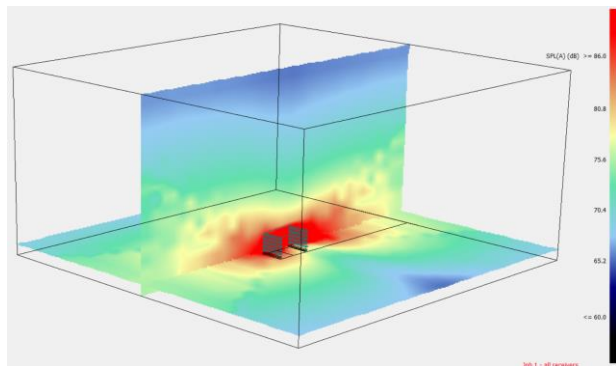
Pirmiausia buvo sumodeliuotas garso slėgio lygio slopinimas laisvajame lauke be garso izoliuojančio gaubto (3.34 pav., 3.35 pav.). Remiantis modeliavimo rezultatais, garso slėgio lygis visomis kryptimis buvo slopinamas vienodai. Remiantis literatūra, garso slėgio lygis sumažėja 6 dB, padvigubėjus atstumui ir gali būti aprašomas (3.10) formule:

$$L_p = L_w - 10 \lg(r^2) - 10 \lg(\Omega), \quad (3.10)$$

čia L_w – garso galios lygis, dB; R – atstumas, m; Ω – kryptingumo koeficientas.

Analizuojant gautus rezultatus galima teigti, kad garso slėgio lygio vertės atitiko teorinę formulę. Garso slėgio lygio skirtumas 1 m atstumu nuo garso šaltinio ir 2 m atstumu nuo garso šaltinio buvo 6 dB. Tas pats rezultatas buvo gautas tarp matavimo taškų 2 ir 4 m atstumu. Dėl garso šaltinio (dyzelinio generatoriaus) charakteristikų didžiausios garso slėgio vertės buvo esant vidutiniams dažniams ir siekė iki 78 dB.

Kitu etapu buvo modeliuojama garso izoliuojanti konstrukcija, kurios sienas sudarė plokštės su 25 mm gumos granulių plokšte (3.36 pav., 3.37 pav.).

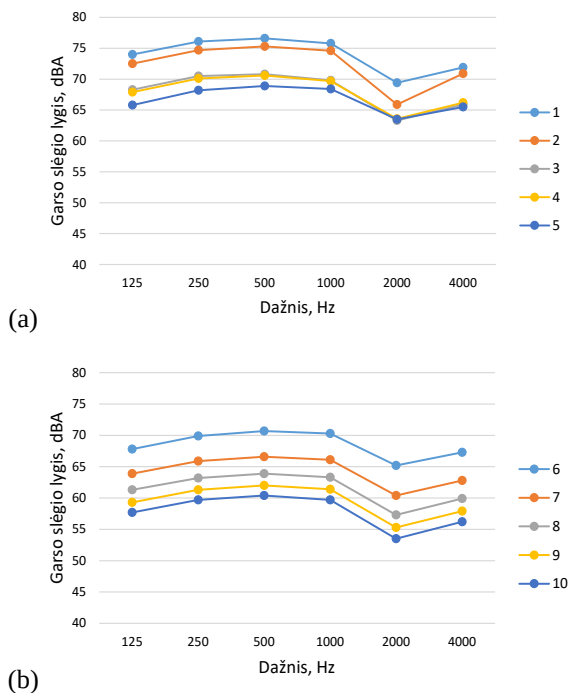


3.36 pav. Garso slėgio lygio vertės, kai gaubto plokštės yra horizontalioje padėtyje

Fig. 3.36. Sound pressure levels when the plates of the enclosure are in a horizontal position

Remiantis modeliavimo rezultatais nustatyta, kad garso slopinimas priklausė nuo krypties. Aukštesni garso slopinimo rezultatai buvo nustatyti Y ašyje (6–10 matavimo taškai), kurie buvo išilgai konstrukcijos šoninių sienų. Konst

rukcijos šoninės sienelės sumažino garso slėgio lygį 5–7 dB esant vidutiniams dažniams ir 8–10 dB aukštiesiems dažniams, lyginant su modeliavimo rezultatais be gaubto. Garso slopinimo lygis priklausė nuo atstumo nuo triukšmo šaltinio. Vidutinis garso lygio sumažėjimas padidėjo 2–3 dB, didėjant atstumui nuo šaltinio 1 m. Rezultatai parodė, kad didžiausios garso slėgio lygio vertės buvo esant vidutiniams dažniams ir siekė 60–70 dB(A) priklausomai nuo atstumo.

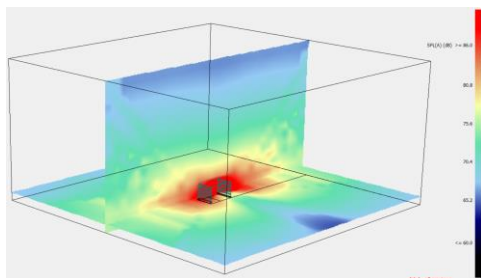


3.37 pav. Garso slėgio lygiai 1/1 oktavo dažnių juostoje priimtuvo taškuose, plokštės yra horizontalioje padėtyje: a – priimtuvo taškai X ašyje; b – priimtuvo taškai Y ašyje

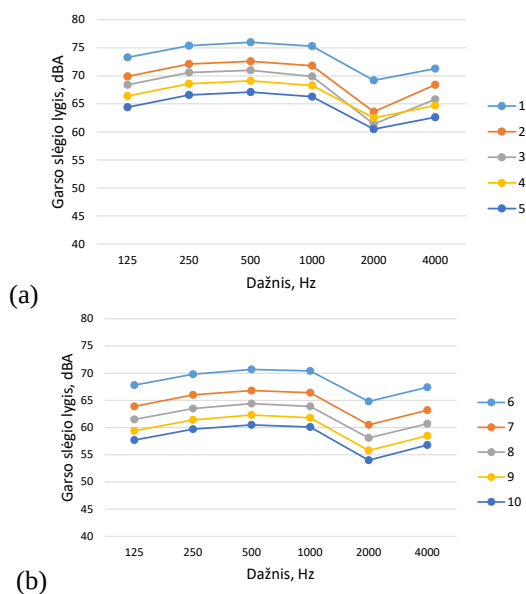
Fig. 3.37. Sound pressure levels in 1/1 octave frequency band at each receiver point when plates are in horizontal position: a – receiver points on the X-axis; b – receiver points on the Y-axis

Taip pat dėl kritinio šoninių sienelių konstrukcijos dažnio, kuris buvo esant 4000 Hz, nustatyta, kad garso slėgio lygis padidėja 3 dB, lyginant su garso lygiu, kai yra 2000 Hz. Analizuojant modeliavimo rezultatus nustatyta, jog silpniausia konstrukcijos dalis yra galinės sienos, kurios yra iš dalies atviros. X ašyje (1–5 matavimo taškai) garso slėgio lygio vertės yra iki 5 dB didesnės nei Y ašyje. Modeliuojant aplink angas susidarė aukšto garso slėgio lygio zonos. Esant vidutiniams dažniams, garso slėgio lygio vertės buvo 68–76 dB(A). Dėl atviros žaliuzių konstrukcijos nebuvo aiškos priklausomybės nuo atstumo. Nustatyta, kad 1 ir 2 matavimo taškuose garso slėgio lygiai buvo panašūs, skirtumas tarp šių taškų siekė tik 2 dB esant vidutiniams dažniams, išskyrus 2000 Hz. Trečiame taške garso lygis sumažėja 5 dB ir rezultatai buvo identiški 4 ir 5 taške. Todėl galima daryti išvadą, kad žaliuzių konstrukcija stiprina garso bangas ir sukuria skirtingas garso slėgio lygio zonas. Dėl šios priežasties 2 m aplink gaubtą, esant galinių sienų garso slėgio lygio vertėms, garso lygis sumažėjo buvo tik 2 dB,

lyginant su rezultatais be gaubto, todėl modeliuojant tokio tipo gaubtą, jo efektyvumas padidėja tik ties 3 m nuo konstrukcijos.



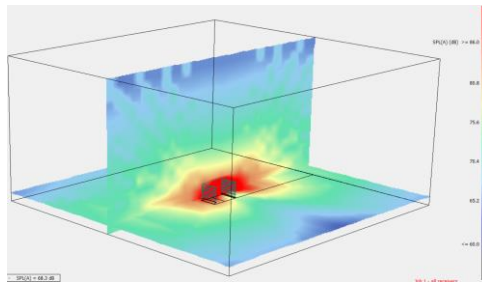
3.38 pav. Garso slėgio lygiai, kai gaubto plokštės pakreiptos 15° kampų
Fig. 3.38. Sound pressure levels when the plates of the enclosure were tilted at 15 degrees



3.39 pav. Garso slėgio lygiai 1/1 oktavos dažnių juostoje priimtuvo taškuose, plokštės pakreipus 15° kampų: a – priimtuvo taškai X ašyje; b – priimtuvo taškai Y ašyje
Fig. 3.39. Sound pressure levels in 1/1 octave frequency band at each receiver point when plates were tilted at 15 degrees: a – receiver points on the X-axis; b – receiver points on the Y-axis

Pakreipus galinių sienų plokštės 15° kampų (3.38 pav., 3.39 pav.) garso slėgio lygiai Y ašyje buvo panašūs į ankstesnius rezultatus, ir taip buvo todėl, kad

šoninės sienelės konstrukcija nepasikeitė. Palyginus modeliavimo rezultatus su ankstesniu modeliavimu, galima teigti, kad aukšto garso slėgio zona buvo mažesnė. Remiantis bandymų rezultatais, garso slėgio lygiai X ašyje 1 m atstumu nuo garso šaltinio siekė iki 76 dB, esant 500 Hz dažniui. Didžiausias garso slėgio lygis buvo esant vidutiniams dažniams. Didesnės garso lygio sumažėjimo vertės buvo nustatytos 2 m nuo garso šaltinio, esant vidutiniams dažniams vertės sumažėjo 5 dB. Didėjant atstumui kas metrą nuo 2 m iki 5 m nuo gaubto, garso slėgio lygiai sumažėjo 2 dB visoje dažnių juostoje. Lyginant dvi skirtingas konstrukcijas su 0° ir 15° pakreiptomis plokštėmis, garso slopinimas su 15° pakreiptomis plokštėmis buvo 1–3 dB didesnis nei konstrukcijos, kurios plokštės buvo horizontalioje padėtyje (0°).

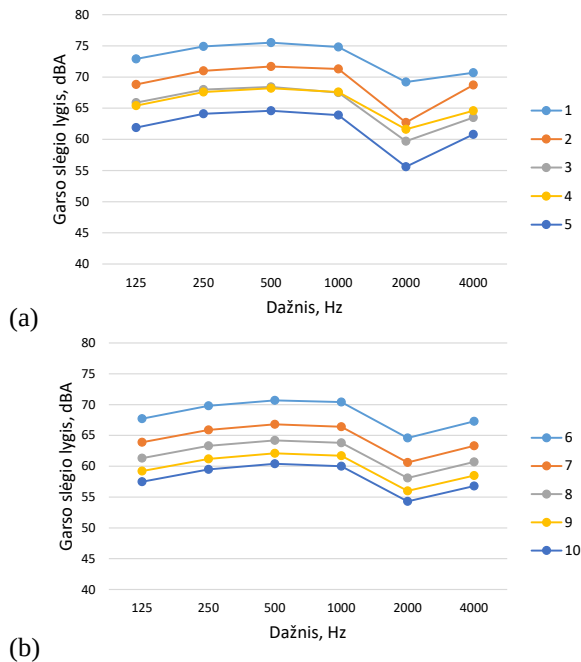


3.40 pav. Garso slėgio lygiai, kai plokštės pakreiptos 30° kampu

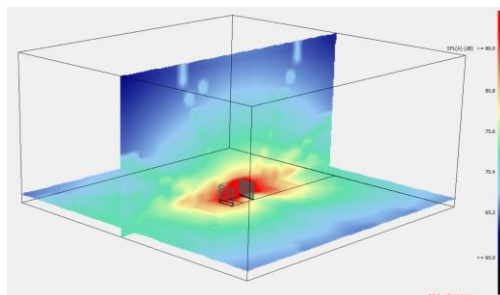
Fig. 3.40. Sound pressure levels when the plates of the enclosure were tilted at 30 degrees

Modeliavimo rezultatai parodė, kad galinės plokštės pakreipus 30° kampu (3.40 pav., 3.41 pav.) Y ašyje, garso slėgio lygiai nesiskyrė, lyginant su ankstesniais rezultatais. Vidutinis garso lygio sumažėjimas padidėjo 2–3 dB, didėjant atstumui nuo šaltinio 1 m. Skirtumas Y ašyje buvo tik 1 dB, palyginti su ankstesnėmis konstrukcijomis. Rezultatai parodė, kad didžiausios garso slėgio lygio vertės buvo esant vidutiniams dažniams, kai vertės siekė 60–70 dBA priklausomai nuo atstumo. X ašyje modeliavimo rezultatai parodė, kad garso slėgio lygiai 1 m ir 2 m atstumu nuo gaubto buvo panašūs į ankstesnių konfigūracijų konstrukcijas, garso lygio sumažėjimas buvo 0,5–1,1 dB geresnis nei konstrukcijos su 15° pakreiptomis plokštėmis. 3 m atstumu nuo gaubto garso slėgio lygis siekė 68 dB ir garso lygio sumažėjimas buvo iki 3 dB aukštesnis nei konstrukcijos su 15° pakreiptomis plokštėmis. 4 m atstumu nuo garso šaltinio garso slėgio lygis buvo labai panašus į trečiąjį tašką, tačiau esant 2000 Hz aukštiesiems dažniams dėl konstrukcijos rezonanso garso slėgio lygis buvo 1 dB didesnis nei trečiame taške. 5 m atstumu nuo šaltinio garso slėgio lygiai sumažėjo

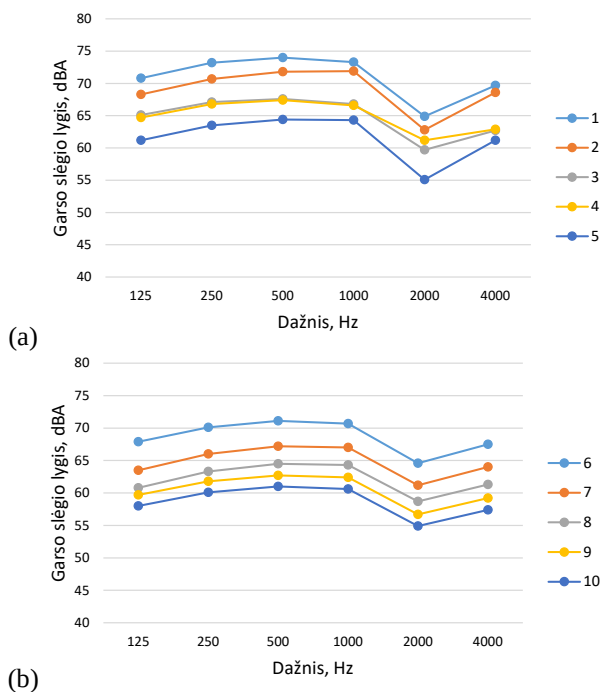
5 dB nuo 63 iki 4000 Hz ir 2 dB esant 8000 Hz, lyginant su rezultatais, gautais 4 m atstumu nuo šaltinio.



3.41 pav. Garso slėgio lygiai 1/1 oktavos dažnių juostoje priimtovo taškuose, plokštės pakreipus 30° kampu: a – priimtovo taškai X ašyje; b – priimtovo taškai Y ašyje
Fig. 3.41. Sound pressure levels in 1/1 octave frequency band at each receiver point when plates were tilted at 30 degrees: a – receiver points on the X-axis; b – receiver points on the Y-axis



3.42 pav. Garso slėgio lygiai, kai plokštės pakreiptos 45° kampu
Fig. 3.42. Sound pressure levels when the plates of the enclosure were tilted at 45 degrees



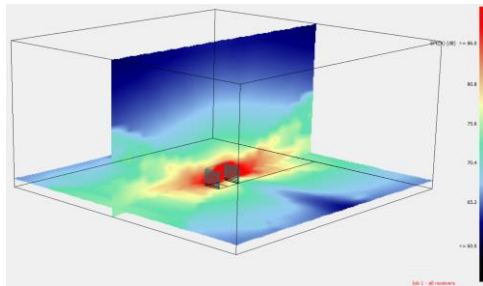
3.43 pav. Garso slėgio lygiai 1/1 oktavos dažnių juostoje priimtovo taškuose, plokštės pakreipus 45° kampu: a – priimtovo taškai X ašyje; b – priimtovo taškai Y ašyje

Fig. 3.43. Sound pressure levels in 1/1 octave frequency band at each receiver point when plates were tilted at degrees: a – receiver points on the X-axis; b – receiver points on the Y-axis

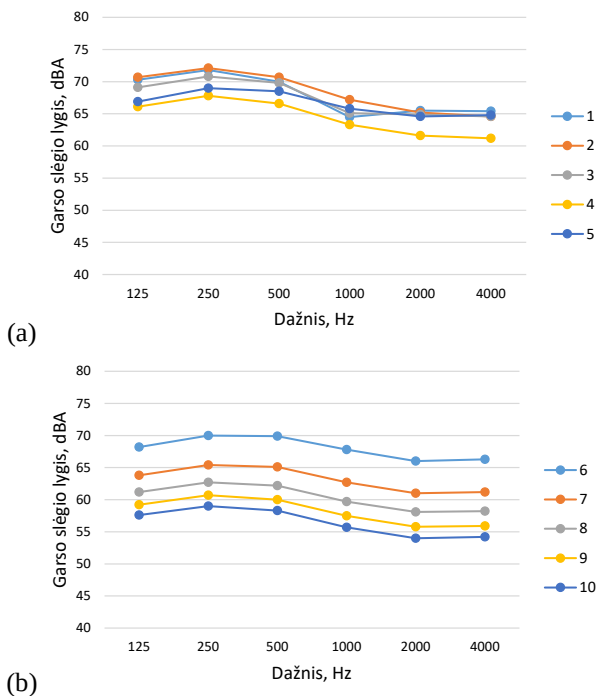
Kai plokštės buvo pakreiptos 45° kampu, buvo nustatyta ta pati tendencija (3.42 pav., 3.43 pav.). Rezultatai Y ašyje labai nepasikeitė ir buvo panašūs į ankstesnius rezultatus. X ašyje pirmame matavimo taške, kuris buvo 1 m atstumu nuo garso šaltinio, garso slėgio lygis esant vidutiniams dažniams ties 500 Hz siekė 74 dB. Lyginant rezultatą su konstrukcija, kurios plokštės pakreiptos 30° kampu, garso lygio sumažėjimas buvo 1–4 dB didesnis. Antrame matavimo taške (2 m) garso slėgio lygis sumažėjo 1–2 dB. Skirtumas tarp antrojo ir trečiojo matavimo taškų siekė 3–5 dB. Dėl konstrukcijos rezonanso garso slėgio lygiai ketvirtame taške buvo panašūs į trečią tašką ir aukštesni esant 2000 Hz. Penktame matavimo taške vidutinių dažnių garso lygis sumažėjo 3–4 dB, o aukštuose – 2–3 dB.

Siekiant padidinti gaubto efektyvumą, gumos plokščių sluoksnio storis buvo padidintas nuo 25 iki 50 mm. Šoninės sienos konstrukciją sudarė 15 mm gipso kartono plokštės, 50 mm gumos granulių sluoksnis, 15 mm gipso kartono

plokštės. Galinių sienų plokštės buvo padengtos 50 mm storio gumos granulių plokšte.

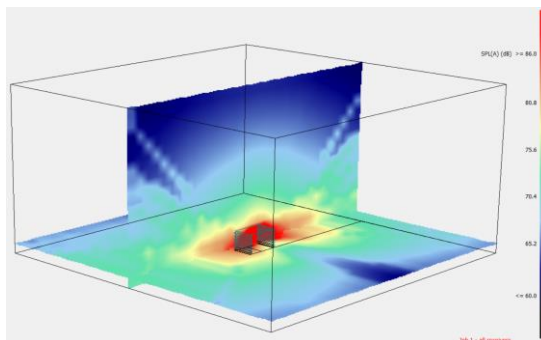


3.44 pav. Garso slėgio lygiai, kai plokštės yra horizontalioje padėtyje
Fig. 3.44. Sound pressure levels when the plates of the enclosure are in a horizontal position



3.45 pav. Garso slėgio lygiai 1/1 oktavos dažnių juostoje priimtuvo taškuose, plokštės yra horizontalioje padėtyje: a – priimtuvo taškai X ašyje; b – priimtuvo taškai Y ašyje
Fig. 3.45. Sound pressure levels in 1/1 octave frequency band at each receiver point when plates are in horizontal position: a – receiver points on the X-axis; b – receiver points on the Y-axis

Atlikus modeliavimą su konstrukcija, kurios galinių sienų plokštės buvo horizontalioje padėtyje (3.44 pav., 3.45 pav.), išliko tos pačios tendencijos. Y ašyje, kurioje buvo 6–10 matavimo taškai, garso slėgio lygio sumažėjimas priklausė nuo atstumo. 1 m atstumu nuo garso šaltinio garso slėgio lygiai esant vidutiniams dažniams siekė 70 dB. Esant aukštesniems dažniams garso slėgio lygiai buvo mažesni ir siekė 57–66 dB. Padidinus atstumą 1 m, garso lygio slėgis sumažėjo 3–5 dB visame dažnių spektre. Gaubto konstrukcija sumažino garso lygį nuo 4 iki 8 dB esant žemesiems ir vidutiniams dažniams (63–500 Hz) ir nuo 9 iki 11 dB – aukštiesiems dažniams (1000–8000 Hz), lyginant su modeliavimo rezultatu be gaubto. 1–5 pozicijose, kurios buvo išilgai X ašies, garso slėgio lygiai 1 m atstumu nuo garso šaltinio sumažėjo nuo 4 iki 8 dB esant vidutiniams dažniams ir 10–13 dB – aukštiesiems dažniams, palyginti su modeliavimo rezultatais be jokio gaubto. Dėl rezonanso 2–5 matavimo taškuose garso slėgio vertės išaugo esant žemesiems ir vidutiniams dažniams. Skirtumas tarp rezultatų, gautų matuojant su gaubtu ir be jo, siekė 0,5–4 dB. Kita vertus, korpusas gana gerai izoliuoja aukštuosius dažnius, tad garso slopinimo efektyvumas buvo nuo 2 iki 7 dB.

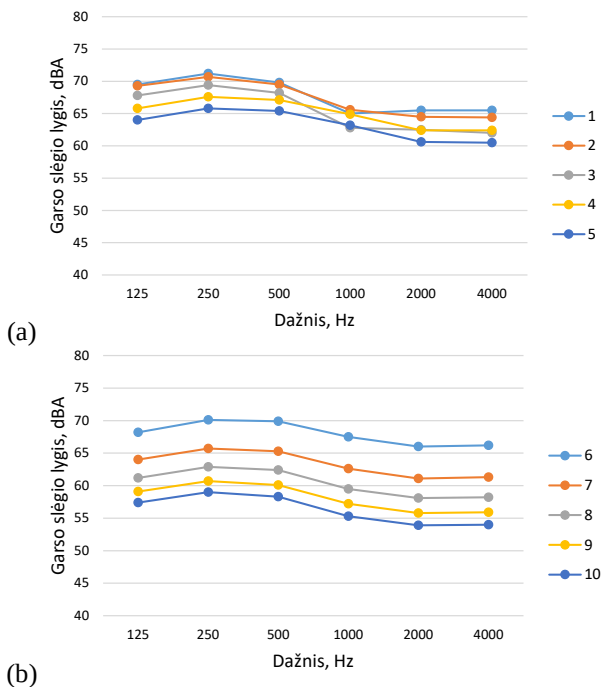


3.46 pav. Garso slėgio lygiai, kai plokštės pakreiptos 15° kampu

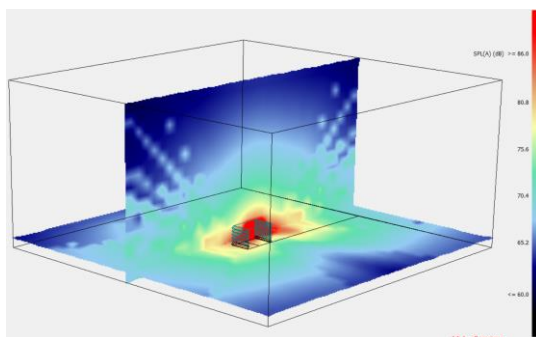
Fig. 3.46. Sound pressure levels when the plates of the enclosure were tilted at 15 degrees

Padidinus galinių sienų plokščių posvyrio kampą nuo 0° iki 15° (3.46 pav., 3.47 pav.), Y ašyje modeliavimo rezultatų skirtumo nerasta, nes šoninių sienelių konstrukcija išliko ta pati. Didesnis plokščių posvyrio kampas paveikė rezultatus tik 1–5 taškuose, kurie buvo išilgai X ašies. Lyginant gaubto su 15° pakreiptomis plokštėmis ir horizontaliomis plokštėmis rezultatus, garso slėgio lygis sumažėjo apie 1–3 dB 1–3 taškuose visu dažnių diapazonu. Ketvirtajame matavimo taške dėl interferencijos susidarė aukštesnė garso slėgio zona ir vertės buvo 1–2 dB didesnės nei ankstesnės konstrukcijos. Penktoje pozicijoje garso slėgio vertės siekė 66 dB esant 250 Hz ir 60 dB esant 2000–4000 Hz, todėl garso slėgio lygis

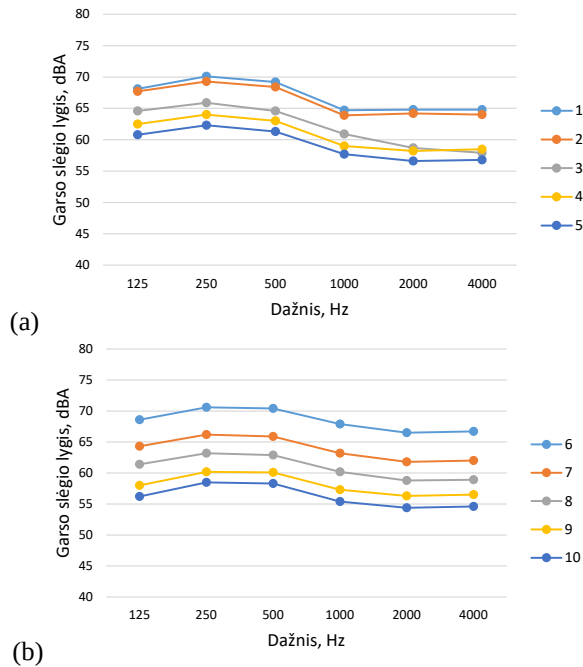
buvo 3–5 dB mažesnis nei konstrukcijoje su horizontaliomis galinėmis plokštėmis.



3.47 pav. Garso slėgio lygiai 1/1 oktavos dažnių juostoje priimtovo taškuose, plokštės pakreipus 15° kampui: a – priimtovo taškai X ašyje; b – priimtovo taškai Y ašyje
Fig. 3.47. Sound pressure levels in 1/1 octave frequency band at each receiver point when plates were tilted at 15 degrees: a – receiver points on the X-axis; b – receiver points on the Y-axis



3.48 pav. Garso slėgio lygiai, kai plokštės pakreiptos 30° kampui
Fig. 3.48. Sound pressure levels when the plates of the enclosure were tilted at 30 degrees

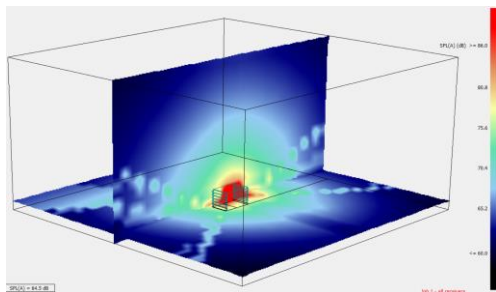


3.49 pav. Garso slėgio lygiai 1/1 oktavos dažnių juostoje priimtovo taškuose, plokštės pakreipus 30° kampui: a – priimtovo taškai X ašyje; b – priimtovo taškai Y ašyje
Fig. 3.49. Sound pressure levels in 1/1 octave frequency band at each receiver point when plates were tilted at 30 degrees: a – receiver points on the X-axis; b – receiver points on the Y-axis

Kai plokštės buvo pakreiptos 30° kampui (3.48 pav., 3.49 pav.), rezultatai Y ašyje buvo panašūs į ankstesnius rezultatus. Tačiau didelis skirtumas buvo nustatytas 1–5 matavimo taškuose išilgai X ašies. Visose pozicijose garso slėgio lygiai buvo mažesni nei ankstesni modeliavimo rezultatai (15°). Pirmame ir antrame matavimo taškuose garso slėgio lygiai sumažėjo nuo 0,5 iki 2 dB, palyginti su paskutiniais rezultatais. Geresnis efektyvumas buvo nustatytas 3–5 taškuose. Didžiausias garso slėgio lygis esant vidutiniams dažniams siekė 62–66 dB. Pakeitus galinių plokščių kampą nuo 15° iki 30° , garso slėgio lygiai 3–5 taškuose visoje dažnių juostoje sumažėjo nuo 2 iki 6 dB.

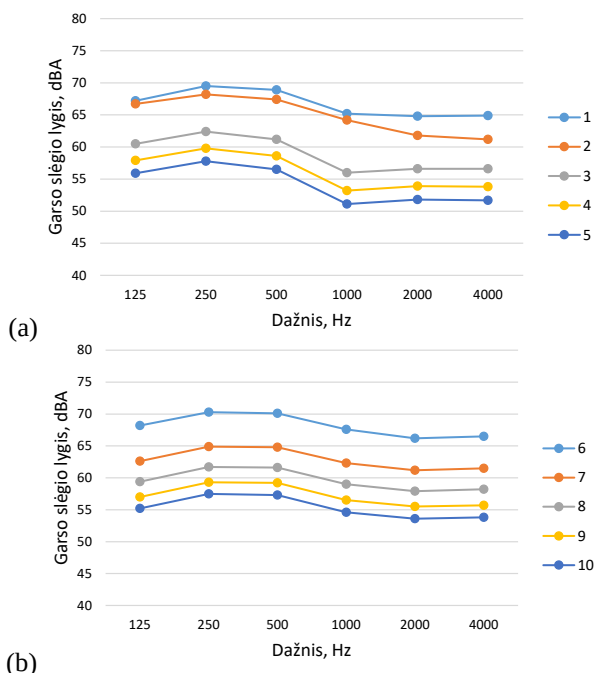
Plokštės pakreipus 45° kampui (3.50 pav., 3.51 pav.) Y ašyje garso slėgio lygių reikšmingų pokyčių nebuvo, rezultatai buvo panašūs į ankstesnius. Lyginant gaubto modeliavimo rezultatus su 45° ir 30° pakreiptomis plokštėmis, garso slėgio vertės šiek tiek sumažėjo 1 ir 2 taškuose, skirtumas siekė 1–3 dB. Aukščiausios garso slėgio vertės buvo esant vidutiniams dažniams ir siekė 68–70 dB. Modeliavimo rezultatai parodė, kad 3–5 taškuose garso slėgio lygio vertės

sumažėjo 6–8 dB esant vidutiniams dažniams ir 3–4 dB – aukštiesiems dažniams, lyginant su 2 matavimo tašku, ir buvo 2–7 dB mažesnės nei gaubte, kai plokštės buvo pakreiptos 30° kampu.



3.50 pav. Garso slėgio lygiai, kai plokštės pakreiptos 45° kampu

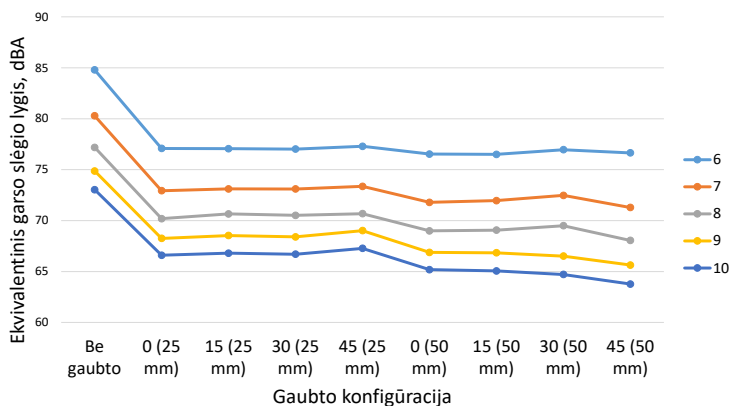
Fig. 3.50. Sound pressure levels when the plates of the enclosure were tilted at 45 degrees



3.51 pav. Garso slėgio lygiai 1/1 oktavos dažnių juostoje priimtuvo taškuose, plokštės pakreipus 45° kampu: a – priimtuvo taškai X ašyje; b – priimtuvo taškai Y ašyje

Fig. 3.51. Sound pressure levels in 1/1 octave frequency band at each receiver point when plates were tilted at 45 degrees: a – receiver points on the X-axis; b – receiver points on the Y-axis

Dyzeliniai generatoriai dažniausiai sukuria žemojo ir vidutinio dažnio triukšmą. Vidutinis dyzelinių generatorių garso galios lygis yra 95–100 dB žemųjų dažnių diapazone esant 63–250 Hz, 90–95 dB vidutinių dažnių diapazone esant 500–1000 Hz ir 80–90 dB aukštųjų dažnių diapazone (2000–8000 Hz). Gana plonos konstrukcijos (50 arba 75 mm), tokios kaip šiame tyrime naudojamos pertvaros, nepasižymi dideliu efektyvumu esant žemiesiems dažniams, nes remiantis akustikos teorija turėtų būti naudojamos storos ir sunkios konstrukcijos, tačiau plonesnės konstrukcijos gana gerai veikia tiek esant viduriniams, tiek aukštiesiems dažniams (500–8000 Hz). Remiantis teorija galima teigti, kad vidutiniai dažniai yra garsiausi arba pastebimiausi. Kita vertus, žemieji ir aukštieji dažniai yra mažiau pastebimi. Dėl šios priežasties, norint sumažinti įrenginių, tokių kaip dyzeliniai generatoriai, garso slėgio lygį, labai svarbu izoliuoti vidutinio dažnio triukšmą (500–1000 Hz). Taip pat svarbu užtikrinti laisvą oro cirkuliaciją korpuso viduje, nes generatoriaus darbui reikalingas oras. Dėl šios priežasties angos buvo suformuotos kaip žaliuzių konstrukcija, kurios plokštės buvo padengtos gumos granulių plokštėmis. Gumos granulių plokštė veikė kaip garsą sugerianti medžiaga, todėl leido padidinti garso sumažinimo efektyvumą, nes dalis garso energijos buvo sugerta. Šiame tyrime buvo modeliuojamas garso slėgio lygio slopinimas. 1–5 matavimo taškai buvo X ašyje išilgai gaubto angos, o 6–10 taškai – Y ašyje šalia sienos.

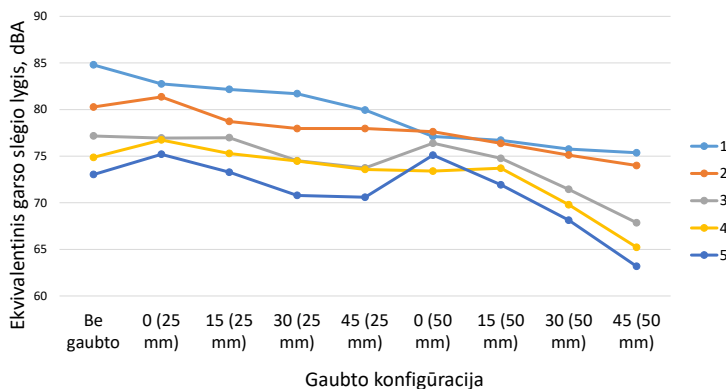


3.52 pav. Ekvivalentinis garso slėgio lygis priimtuvo taškuose Y ašyje su kiekviena gaubto konfigūracija

Fig. 3.52. Equivalent sound pressure level at receiver points on the Y-axis with each enclosure configuration

Analizuojant garso sumažėjimo rezultatus Y ašyje 6–10 taškuose (3.52 pav.), galima teigti, jog garso slėgio lygiai nepriklausė nuo žaliuzių plokščių kampo. Įvairių gaubto konfigūracijų garso mažinimo vertės buvo gana panašios. Garso

izoliacijos skirtumas priklausė tik nuo šoninės sienelės konstrukcijos. Šoninė sienelė su 50 mm storio gumos granulių plokšte sumažino garso slėgio lygį 2 dB geriau nei konstrukcija su 25 mm storio gumos plokšte. Taip pat galima teigti, kad garso slėgio vertės mažėjo didėjant atstumui. 5 m atstumu nuo garso šaltinio garso slėgio vertės buvo mažesnės nei 65 dB, o šis rezultatas atitiko higienos normos reikalavimus.



3.53 pav. Ekvivalentinis garso slėgio lygis priimtuvo taškuose X ašyje su kiekviena gaubto konfigūracija

Fig. 3.53. Equivalent sound pressure level at receiver points on the X-axis with each enclosure configuration

X ašyje, kur buvo 1–5 matavimo taškai (3.53 pav.), garso slėgio lygiai priklausė nuo gaubto konfigūracijos. Galima teigti, kad, didinant galinių plokščių posvyrio kampą, garso slėgio vertės mažėjo. 5 m atstumu, keičiant plokštės posvyrio kampą 15°, garso slėgio lygis sumažėja iki 4 dB. Garso slėgio lygio skirtumas, kai plokštės yra horizontalioje padėtyje ir pakreiptos 45° kampu, siekia iki 12 dB. Kai kuriais atvejais plokštės veikė kaip rezonatorius, todėl garso slėgio vertės padidėjo. 2, 4, 5 matavimo taškuose, kai plokštės buvo horizontalioje pozicijoje ir padengtos 25 mm gumos granulių plokšte, ekvivalentinės garso slėgio vertės buvo 3–4 dB didesnės, lyginant su garso slėgio lygio vertėmis, kai gaubtas nebuvo įrengtas. Kai plokštės buvo pakreiptos 15°, 30°, 45°, ekvivalentinės garso slėgio lygio vertės mažėjo didėjant plokščių posvyrio kampui. Panašūs rezultatai gauti naudojant 50 mm storio gumos granulių plokštę. Garso slėgio lygiai sumažėjo padidinus galinių plokščių posvyrio kampą. Tik viena konfigūracija, kurios plokštės buvo pakreiptos 15°, dėl rezonanso garso slėgio lygiai padidėjo, palyginti su konstrukcija, kurios plokštės buvo horizontalioje padėtyje. Lyginant garso slopinimo efektyvumą tarp konstrukcijos su 25 mm ir 50 mm gumos granulių plokštėmis, galima teigti, kad gaubtas su 50 mm guma sumažino garso slėgio lygį 3–7 dB geriau. Taip pat tik viena

konstrukcija atitiko ekvivalentinio garso slėgio lygio reikalavimą. Kad būtų pasiektas mažesnis nei 65 dB ekvivalentinio garso slėgio lygis 4 m atstumu nuo garso šaltinio, kai dyzelinio generatorius garso galios lygis yra $L_w = 103$ dBA, gaubto galinės plokštės turi būti pakreiptos 45° kampu ir padengtos 50 mm storio gumos granulių plokštėmis.

Apibendrinant modeliavimo rezultatus, galima teigti, kad buvo nustatyta priklausomybė nuo plokščių posvyrio kampo – kuo didesnis posvyrio kampas, tuo geresnis garso slopinimas. Taip buvo todėl, kad didėjant plokščių kampui garso sklidimo kelyje buvo didesnis sugeriančios medžiagos plotas, todėl sugeriančios medžiagos efektyvumas buvo geresnis. Taip pat storesnė garsą sugerianti medžiaga turėjo geresnę garso sugertį ir garso sugertį platesniu dažnių diapazonu, todėl gaubto su 50 mm gumos granulių plokšte buvo geresni garso slopinimo rezultatai. Gaubto konstrukcijoje naudojant 50 mm storio gumos granulių plokštes, garso slėgio lygį 5 m atstumu galima sumažinti iki 10 dB.

3.6. Garsą izoliuojantis gaubtas

Šiame poskyryje pateikiami disertacijos pagrindu sukurto garsą izoliuojančio gaubto parametrai. Ši konstrukcija patentuota Lietuvoje.

Triukšmą mažinantis gaubtas kaip triukšmą mažinantis įrenginys aprašytas patente US2018310720 (A1), paskelbtame 2018 m. lapkričio 1 d. Šio įrenginio sienos padengtos garsą sugeriančia medžiaga, jis turi atvirą dugną ir priekį, o tai užtikrina viduje esančio įrenginio vėdinimą. Konstrukcijoje panaudota garsą sugerianti medžiaga leidžia absorbuoti dalį garso energijos ir taip mažinti įrenginio keliamą triukšmą.

Taip pat triukšmą mažinantis gaubtas parašytas patente RU2671279 (c), išleistame 2018 m. spalio 30 d. Šis įrenginys skirtas generatorių, ventiliatorių ir kitų įrenginių, kuriems reikalingas oro įsiurbimas ir išmetimas, keliamam triukšmui mažinti. Įrenginį sudaro gaubtas, padengtas garsą absorbuojančia medžiaga, su jame įmontuotu aerodinaminio duslintuvu, per kurį išmetamas ir paduodamas oras. Tokia konstrukcija leidžia izoliuoti įrenginio keliamą triukšmą. Oro įsiurbimo ir išmetimo angas prijungus prie aerodinaminio duslintuvo, galima užtikrinti įrenginio veikimą, sykiu neleidžiant skliti įrenginiui veikiant atsirandančiam triukšmui.

Pirmojo prototipo trūkumas tas, kad per atviras angas triukšmas laisvai sklinda į aplinką, o vien garsą absorbuojančiomis medžiagomis padengtos sienos efektyviai nesumažina triukšmo.

Antrojo prototipo trūkumas tas, kad konstrukcija yra gana masyvi, ji tvirtinama ant antivibracinių tarpinių. Konstrukcija projektuojama tik konkrečiam

įrenginiui, nes reikia numatyti oro išmetimo ertmes, prie kurių prijungiamas aerodinaminis duslintuvas.

Garsą izoliuojantis gaubtas turi būti suprojektuotas taip, kad užtikrintų reikiamą oro tiekimą įrenginiui. Todėl galinės gaubto sienelės sudarytos iš plokštelių, prie kurių priklijuota garsą sugerianti medžiaga – gumos granulių plokštė. Plokštės į rėmą įstatytos taip, kad galėtų būti keičiamas jo posvyrio kampas. Triukšmą mažinančios žaliuzės, padengtos gumos granuliatu, taip pat patentuotos Lietuvoje.

Triukšmą mažinančios žaliuzės kaip triukšmą mažinantis įrenginys yra aprašytas patente US 005168130 A, paskelbtame 1992 m. gruodžio 1 d., siekiant sumažinti stacionarių triukšmo šaltinių triukšmą, kuriems būtinas vėdinimas ar oro įsiurbimas ir išmetimas. Tokio tipo įrenginių negalima aklinau uždengti garsą sugeriančiomis konstrukcijomis, todėl reikalingos konstrukcijos, kurios praleistų orą, bet sulaikytų ir sumažintų triukšmą.

Taip pat triukšmą mažinančios žaliuzės aprašytos Lietuvos patente Nr. 5935, paskelbtame 2013 m. gegužės 27 d., kurios nuo pirmojo skiriasi tuo, jog plokštelės gali keisti savo posvyrio kampą ir yra padengtos triukšmą sugeriančia medžiaga.

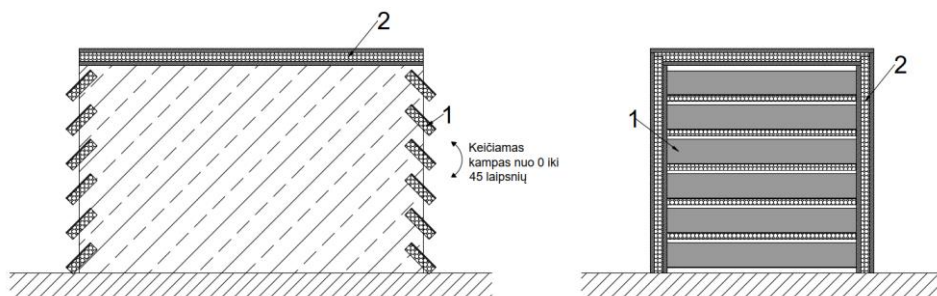
Pirmojo prototipo trūkumas tas, jog žaliuzių plokštelės įtvirtintos stacionariai, todėl negalima keisti jų posvyrio kampo. Taip pat plokštelės nėra padengtos garsą sugeriančia medžiaga.

Antrojo prototipo trūkumas tad, jog konstrukcijos plokštelės yra pagamintos iš medžio drožlių plokštės. Kaip garso sugerianti medžiaga panaudota stiklo vatos plokštė. Tokia konstrukcija nėra tinkama naudoti lauko sąlygomis, nes panaudotos medžiagos nėra atsparios drėgmei.

Garsą izoliuojančio gaubto veikimo principas paremtas garso izoliacija ir sugertimi (3.54, 3.55 pav.). Garsą izoliuojančio gaubto šoninės sienelės (2) pagamintos iš disertacijoje tirtų garsą izoliuojančių konstrukcijų su gumos granulių plokštėmis. Gumos granulių plokštės, įmontuotos tarp dviejų standžių plokščių (gipso kartono, perdirbto plastiko ar plieno), yra palyginti plonos konstrukcijos. Jas naudojant, gaubtas gali būti prireikus išrenkamas ir transportuojamas į kitą vietą. Keičiant gumos storį gaubto konstrukcijoje, galima kontroliuoti šoninių sienelių garso izoliaciją atsižvelgiant į įrenginio garso galios lygio spektrą.

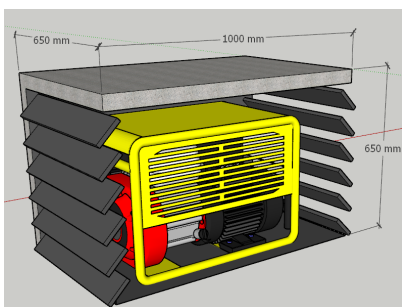
Siekiant užtikrinti, jog, įrengus konstrukciją, įrenginio veikimas nebūtų sutrikdytas dėl ventiliacijos trūkumo, galinės gaubto sienelės yra žaliuzių konstrukcijos (1) (3.55 pav.). Konstrukcijos veikimo principas paremtas tuo, jog sklindančios bangos susiduria su konstrukcijos plokštėmis, padengtomis gumos granulių plokštėmis, kurios dėl savo akustinių savybių sugeria dalį sklindančio triukšmo. Triukšmas, perėjęs pro gumos granulių sluoksnį, susiduria su pagrindo plokšte, kuri dėl savo struktūros dalį triukšmo praleidžia, o kitą dalį atspindi. Atsispindėjęs triukšmas dar kartą papildomai sugeriamas gumos granulių

sluoksniu, o pro metalinę plokštę perėjęs triukšmo lygis susiduria su dar vienu gumos granuliato sluoksniu ir dar kartą absorbuojamas. Dėl tokios žaliuzių konstrukcijos, priklausomai nuo plokštelių posvyrio kampo, triukšmo lygis gali būti sumažinamas iki 12 dB.



3.54 pav. Garsą izoliuojantis gaubtas

Fig. 3.54. Sound insulating enclosure



3.55 pav. Garsą izoliuojantis gaubto 3D modelis

Fig. 3.55. 3D model of sound insulating enclosure

Ši konstrukcija išsiskiria iš kitų tuo kad:

- garsą izoliuojančio gaubto konstrukcijoje naudojamos iš perdirbtų padangų gumos granulių pagamintos garsą izoliuojančios gaubto sienelės;
- garsą izoliuojančio gaubto galinės sienelės įrengtos naudojant patentuotą triukšmą mažinančią žaliuzių konstrukciją, siekiant užtikrinti optimalų įrenginio vėdinimą. Žaliuzių konstrukcijos plokštelės padengtos garsą sugeriančiomis gumos granulių plokštėmis, jų posvyrio kampas gali būti keičiamas nuo 0 iki 45°. Gumos granulių plokštės yra atsparios atmosferos ir kitų veiksnių poveikiui;

- garsą izoliuojantį gautą sudaro plonos garsą izoliuojančios ir sugeriančios konstrukcijos, todėl toks gaubtas gali būti išrenkamas ir transportuojamas į kitą vietą.

3.7. Trečiojo skyriaus išvados

1. Padidinus stambiosios frakcijos kiekį 25 %, 15 mm storio mėginių vidutinė garso sugertis sumažėja 9,8 %, 25 mm storio mėginių – 8,4 %, o 50 mm storio mėginių – 9,6 %.
2. Didinant chemiškai devulkanizuotos gumos frakcijos kiekį 25 %, 15 mm storio mėginių vidutinė garso sugertis didėja 7,9 %, 25 mm storio mėginių garso sugertis – 7,6 %, 50 mm storio mėginių sugertis – 7,6 %.
3. Garso perdavimo sumažėjimo vertės didėja didinant gumos mėginio storį konstrukcijoje. Garso perdavimo sumažėjimo vertės konstrukcijose su 50 mm gumos plokštėmis yra 1,5–3 dB didesnės negu konstrukcijose su 25 mm gumos plokštėmis ir 5–5,5 dB didesnės už konstrukcijose su 15 mm gumos granulių plokštėmis.
4. Konstrukcijose didinant gumos plokštės storį, rezonansiniai dažniai nustatomi esant žemesniesiems dažniams: su 15 mm gumos granulių plokštėmis – esant 2000–2500 Hz, su 25 mm – esant 2000 Hz, su 50 mm – esant 1600 Hz.
5. Konstrukcijų su gumos granulių plokštėmis garso izoliavimas, esant rezonansiniams dažniams, yra iki 10 dB aukštesnis, lyginant su konstrukcijomis, kai oro tarpas paliekamas tuščias arba užpildomas mineraline vata.
6. Garso perdavimo sumažėjimo vertės didėja didinant gumos mėginio tankį. Konstrukcijose su 15 ir 25 mm gumos mėginiais, didinant gumos mėginio tankį 30 kg/m^3 , garso perdavimo sumažėjimo vertės didėja 1,3 dB ir 1,0 dB.
7. Didinant gumos granulių plokštės dinaminį standumą 2 MN/m^3 , garso perdavimo sumažėjimo vertės konstrukcijose su 50 mm storio gumos granulių plokšte sumažėja 2,2 dB.
8. Konstrukcijos, sudarytos iš gumos granulių plokštės ir vienos gipso kartono plokštės (GKB arba GKFI), įneštinio silpninimo vertės visoje dažnių juostoje apie 3–4 dB yra aukštesnės, naudojant gumos granulių plokštes, kurių tankis yra aukštesnis negu 730 kg/m^3 .
9. Konstrukciją sudarant iš dviejų gipso kartono plokščių ir gumos granulių plokštės tarp jų, konstrukcijos su didesnio tankio GKFI

plokštėmis garsą izoliuoja vidutiniškai 2–4 dB geriau negu konstrukcijos su mažesnio tankio GKB plokštėmis.

10. Atlikus teorinį TMM modeliavimą nustatyta, jog, didinant gumos mėginio storį, galima kontroliuoti konstrukcijos rezonansą. Atliekant tyrimus su 15 mm gumos plokštėmis, rezonansas nustatomas esant 4000 Hz, su 25 mm plokštėmis – esant 2500–3000 Hz, o su 50 mm storio plokšte rezonansas yra esant 2000 Hz, tačiau atsiranda ir poringosios terpės rezonansas, kuris yra ties 3500–4000 Hz.
11. Garsą izoliuojantis gaubtas garsą skirtingomis kryptimis izoliuoja nevienodai. Priimtuvo taškuose, išdėstytuose Y ašyje, garso mažinimui daugiausia įtakos turi šoninės sienelės konstrukcija, kuri nepriklauso nuo galinių sienelių plokščių posvyrio kampo. Šoninė sienelė, kurios konstrukcijoje yra 50 mm storio gumos plokštė, sumažino garso slėgio lygį 2 dB geriau negu konstrukcija su 25 mm storio gumos granulių plokšte.
12. Gaubtas, kurio galinių sienelių plokštės buvo padengtos 50 mm gumos plokšte, sumažino garso slėgio lygį 3–7 dB geriau nei ta pati konstrukcija su 25 mm storio gumos plokšte.

Bendrosios išvados

1. Atlikus gumos granulių plokščių fizinių savybių eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad gumos granulių plokštės tankis priklauso nuo smulkiosios frakcijos kiekio plokštėje. Didinant smulkiosios frakcijos kiekį 25 %, tankis padidėja 2,3 %. Orinės varžos vertės priklauso nuo chemiškai devulkanizuotos gumos frakcijos kiekio, kurį didinant 25 %, orinė varža didėja 4,1 %. Gumos granulių plokštės dinaminis standumas sumažėja 5,3 %, mažinant smulkiosios frakcijos kiekį 25 %.
2. Atlikus garso sugerties eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad optimali orinė varža, su kuria pasiekiami aukščiausi garso sugerties rezultatai, siekia 80–95 kPa·s/m². Norint užtikrinti tokią orinę varžą, į gumos granulių sudėtį turi įeiti ≥ 50 % chemiškai devulkanizuotų gumos granulių ir ne daugiau kaip 25 % stambiosios ir smulkiosios frakcijos gumos granulių. Taip pat nustatyta, jog garso sugertis priklauso nuo plokštės storio, 15 mm storio gumos granulių plokštės efektyviausiai sugeria 2000–3150 Hz dažnio garsą, 25 mm storio gumos granulių plokštės efektyviausios yra esant 1600–2000 Hz, 50 mm – esant 800–1000 Hz.
3. Atlikus konstrukcijų su gumos granulių plokštėmis garso perdavimo sumažėjimo tyrimus nustatyta, kad, naudojant plonas 15 ir 25 mm storio gumos granulių plokštes, konstrukcijos garso perdavimo sumažėjimas priklauso nuo gumos granulių plokštės masės, didinant gumos plokštės

tankį 30 kg/m^3 , garso perdavimo sumažėjimo vertės abiem atvejais atitinkamai didėja $1,3 \text{ dB}$ ir $1,0 \text{ dB}$. Naudojant storesnę 50 mm storio gumos granulių plokštę, garso perdavimo sumažėjimas priklauso nuo gumos dinaminių savybių, didinant gumos granulių plokštės dinaminį standumą 2 MN/m^3 , garso perdavimo mažėjimo vertės sumažėja $2,2 \text{ dB}$.

4. Išmatavus gumos granulių mėginio akustinę varžą (Z_f) ir bangos skaičių ($k_{0,z}$), galima prognozuoti kelių sluoksnių konstrukcijų su gumos granulių plokštėmis garso perdavimo sumažėjimo vertes. Teorinio modeliavimo rezultatai koreliuoja su eksperimentinių tyrimų rezultatais. Rezonansiniai dažniai didinant gumos mėginio storį, artėja prie žemesnių dažnių diapazono. Padidinus bendrą konstrukcijos masę 20% , perdavimo rezultatai padidėja apie 5 dB per visą dažnių juostą.
5. Remiantis modeliavimo rezultatais, nustatyta priklausomybė nuo plokščių posvyrio kampo – kuo didesnis posvyrio kampas, tuo geresnis garso slopinimas. Didėjant plokščių posvyrio kampui garso sklidimo kelyje, didėja sugeriančio paviršiaus plotas, todėl sugerties efektyvumas didesnis. Storesnė garsą sugerianti medžiaga turi geresnę garso sugertį platesniu dažnių diapazonu, todėl gaubtas su 50 mm gumos granulių plokšte turi aukštesnius garso slopinimo rezultatus. Lyginant garso slopinimo efektyvumą tarp konstrukcijos su 25 mm ir 50 mm gumos granulių plokštėmis, gaubtas su 50 mm guma sumažina garso slėgio lygį $3\text{--}7 \text{ dB}$ geriau. Gaubto konstrukcijoje naudojant 50 mm storio gumos granulių plokštes ir plokštes pakreipus 45° kampu, garso slėgio lygis 5 m atstumu sumažinamas iki 10 dB .

Rekomendacijos

Remiantis disertacijos tema atliktais eksperimentiniais ir teoriniais tyrimais buvo sukurtas garsą izoliuojantis gaubtas. Rekomenduojama išorines gaubto sienas sudaryti iš GKFI gipso kartono plokščių ir gumos granulių plokštės. Galinės gaubto sienos įrengti iš dalies atviras, siekiant užtikrinti tinkamą oro judėjimą, reikalingą įrenginiui vėdinti. Rekomenduojama galinės sienos plokštės įmontuoti taip, jog būtų galima keisti jų posvyrio kampą, ir padengti jas garsą sugeriančiomis gumos granulių plokštėmis. Įrenginiams, kurie generuoja aukštojo dažnio garsą (>1000 Hz), rekomenduojama naudoti konstrukcijas su 25 mm storio gumos granulių plokštėmis, kurių šoninės sienelės – tai konstrukcija su 25 mm storio gumos granulių plokšte, į kurios sudėtį įeina >50 % smulkiosios frakcijos gumos granulių, o galinės plokštės dengtos gumos granulių plokšte, kurios sudėtyje yra >50 % chemiškai devulkanizuotų gumos granulių. Įrenginiams, kurie generuoja žemojo ar vidutinio dažnio garsą (<1000 Hz), rekomenduojama šonines sienelės įrengti naudojant konstrukcijas su 50 mm storio gumos granulių plokštėmis, kurių sudėtyje yra >50 % stambiosios frakcijos granulių, o galines plokštes dengti gumos granulių plokšte, į kurios sudėtį įeina >50 % chemiškai devulkanizuotų gumos granulių.

Naudojant garsą izoliuojantį gaubtą, įrenginio skleidžiamą triukšmą lygi, priklausomai nuo plokščių posvyrio kampo, galima sumažinti iki 10 dB 5 m atstumu nuo įrenginio.

Literatūra ir šaltiniai

- Arjunan, A., Wang, C. J., Yahiaoui, K., Mynors, D. J., Morgan, T., & English, M. (2013). Finite element acoustic analysis of a steel stud based double-leaf wall. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.021>
- Arjunan, A., Wang, C. J., Yahiaoui, K., Mynors, D. J., Morgan, T., Nguyen, V. B., & English, M. (2014). Development of a 3D finite element acoustic model to predict the sound reduction index of stud based double-leaf walls. *Journal of Sound and Vibration*. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.06.032>
- Asaro, L., Gratton, M., Seghar, S., & Aït Hocine, N. (2018). Recycling of rubber wastes by devulcanization. *Resources, Conservation and Recycling*, 133(November 2017), 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.016>
- Azarabtin, S., Mousavi, S. R., Jamalkhani Khameneh, R., Mortazavi, S. M. M., Ehsani, M., Ranjbar, H., & Khonakdar, H. A. (2022). Effect of different devulcanization agents on the mechano-chemical devulcanization process of waste tires. *Materials Today Communications*, 33(May), 104416. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104416>
- Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., Barroso De Aguiar, J. L., & Camões, A. F. (2012). Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.062>
- Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>

- Benkreira, H., Khan, A., & Horoshenkov, K. V. (2011). Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *Chemical Engineering Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.047>
- Branco, F. G., & Godinho, L. (2013). On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.001>
- Brekke, A. (1981). Calculation methods for the transmission loss of single, double and triple partitions. *Applied Acoustics*, 14(3), 225–240. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(81\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0003-682X(81)90034-7)
- Brunskog, J. (2005). The influence of finite cavities on the sound insulation of double-plate structures. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.1904264>
- Brunskog, J. (2012). The forced sound transmission of finite single leaf walls using a variational technique. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(3), 1482–1493. <https://doi.org/10.1121/1.4740501>
- Brunskog, J., & Davidsson, P. (2004). Sound transmission of structures. A finite element approach with simplified room description. *Acta Acustica United with Acustica*.
- Corredor-Bedoya, A. C., Zoppi, R. A., & Serpa, A. L. (2017). Composites of scrap tire rubber particles and adhesive mortar – Noise insulation potential. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.007>
- Costamagna, M., Brunella, V., Luda, M. P., Romagnolli, U., Muscato, B., Giroto, M., Baricco, M., & Rizzi, P. (2022). Environmental assessment of rubber recycling through an innovative thermo-mechanical devulcanization process using a co-rotating twin-screw extruder. *Journal of Cleaner Production*, 348(September 2021), 131352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131352>
- Craik, R. J. M., & Smith, R. S. (2000). Sound transmission through double leaf lightweight partitions. Part I: Airborne sound. *Applied Acoustics*, 61(2), 223–245. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(99\)00070-5](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(99)00070-5)
- Cremer, L., Heckl, M., & Petersson, B. A. T. (2005). *Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*. <https://doi.org/10.1007/b137728>
- Cummings, A., & Mulholland, K. A. (1968). The transmission loss of finite sized double panels in a random incidence sound field. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1), 126–133. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(68\)90199-5](https://doi.org/10.1016/0022-460X(68)90199-5)
- Davidsson, P., Brunskog, J., Wernberg, P.-A., Sandberg, G., & Hammer, P. (2004). Analysis of sound transmission loss of double-leaf walls in the low-frequency range using the finite element method. *Building Acoustics*, 11(4), 239–257. <https://doi.org/10.1260/1351010042900077>
- Davy, J. (2009). Predicting the sound insulation of walls. *Building Acoustics*, 16(1), 1–20. <https://doi.org/10.1260/135101009788066546>
- Davy, J. L. (2010). The improvement of a simple theoretical model for the prediction of the sound insulation of double leaf walls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127, 841–849. <https://doi.org/10.1121/1.3273889>

- Dell, A., Krynkina, A., & Horoshenkov, K. V. (2021). The use of the transfer matrix method to predict the effective fluid properties of acoustical systems. *Applied Acoustics*, 182, 108259. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108259>
- Deng, T., Li, M., Zhang, S., Sheng, X., & Thompson, D. J. (2021). Combining the 2.5D FE-BE method and the TMM method to study the vibro-acoustics of acoustically treated rib-stiffened panels. *Journal of Sound and Vibration*, 493, 115825. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115825>
- Dobrotă, D., & Dobrotă, G. (2019). Reducing of energy consumption by improving the reclaiming technology in autoclave of a rubber wastes. *Energies*, 12(8), 1460. <https://doi.org/10.3390/en12081460>
- Dorigato, A., Rigotti, D., & Fredi, G. (2022). Advanced Industrial and Engineering Polymer Research Recent advances in the devulcanization technologies of industrially relevant sulfur-vulcanized elastomers. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(3), 288–309. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.11.003>
- Ehsan Samaei, S., Berardi, U., Taban, E., Soltani, P., & Mohammad Mousavi, S. (2021). Natural fibro-granular composite as a novel sustainable sound-absorbing material. *Applied Acoustics*, 181, 108157. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108157>
- Fahy, F. (2003). *Foundations of Engineering Acoustics*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-247665-5.X5000-0>
- Fahy, F., & Gardonio, P. (2007). Sound and structural vibration: radiation, transmission and response. *Noise Control Engineering Journal*, 5(3), 373–374(2). <https://doi.org/10.3397/1.2741307>
- Fantilli, A. P., & Chiaia, B. (2018). Mechanical performances of mortar prisms and concrete slabs incorporating rubber aggregates. *Mechanics Research Communications*, 92, 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2018.08.013>
- Formela, K. (2022). Waste tire rubber-based materials: Processing, performance properties and development strategies. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(4), 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.06.003>
- Gandoman, M., & Kokabi, M. (2015). Sound barrier properties of sustainable waste rubber/geopolymer concretes. *Iranian Polymer Journal*, 24(2), 105–112. <https://doi.org/10.1007/s13726-014-0304-1>
- Ganjian, E., Khorami, M., & Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1828–1836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>
- Gerges, N. N., Issa, C. A., & Fawaz, S. A. (2018). Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00184. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00184>
- Gieré, R., Smith, K., & Blackford, M. (2006). Chemical composition of fuels and emissions from a coal + tire combustion experiment in a power station. *Fuel*, 85(16), 2278–2285. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.11.024>
- González, L., Valentín, J. L., Fernández-Torres, A., Rodríguez, A., & Marcos-Fernández, A. (2005). Effect of the network topology on the tensile strength of natural rubber

vulcanizate at elevated temperature. *Journal of Applied Polymer Science*, 98, 1219–1223. <https://doi.org/10.1002/app.22225>

Gu, Q., & Wang, J. (1983). Effect of resilient connection on sound transmission loss of metal stud double panel partitions. *Chinese Journal of Acoustics*, 2(2), 113–126.

Gumede, J. I., Hlangothi, B. G., Woolard, C. D., & Hlangothi, S. P. (2022). Organic chemical devulcanization of rubber vulcanizates in supercritical carbon dioxide and associated less eco-unfriendly approaches: A review. *Waste Management and Research*, 40(5), 490–503. <https://doi.org/10.1177/0734242X211008515>

Hassani, P., Soltani, P., Ghane, M., & Zarrebini, M. (2021). Porous resin-bonded recycled denim composite as an efficient sound-absorbing material. *Applied Acoustics*, 173, 107710. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107710>

Heckl, M. (1981). The tenth Sir Richard Fairey memorial lecture: Sound transmission in buildings. *Journal of Sound and Vibration*, 77(2), 165–189. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(81\)80018-1](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(81)80018-1)

Herrero, S., Mayor, P., & Hernández-Olivares, F. (2013). Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials and Design*, 47, 633–642. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.063>

Hosseinpour, A., Katbab, A. A., & Ohadi, A. (2022). Improving the sound absorption of a highly deformable nanocomposite foam based on ethylene-propylene-diene-monomer (EPDM) infused with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) to absorb low-frequency waves. *European Polymer Journal*, 178(May), 111522. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111522>

Hwang, S., Kim, J., Lee, S., & Kwun, H. (2015). Prediction of sound reduction index of double sandwich panel. *Applied Acoustics*, 93, 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.017>

Isayev, A. I., Liang, T., & Lewis, T. M. (2014). Effect of particle size on ultrasonic devulcanization of tire rubber in twin-screw extruder. *Rubber Chemistry and Technology*, 87(1), 86–102. <https://doi.org/10.5254/RCT.13.87926>

Kang, H.-J., Ih, J.-G., Kim, J.-S., & Kim, H.-S. (2000). Prediction of sound transmission loss through multilayered panels by using Gaussian distribution of directional incident energy. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107, 1413–1420. <https://doi.org/10.1121/1.428428>

Karakurt, C. (2015). Microstructure properties of waste tire rubber composites: an overview. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17, 422–433. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0263-9>

Karger-Kocsis, J., Mészáros, L., & Bárány, T. (2013). Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. *Journal of Materials Science*, 48, 1–38. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6564-2>

Khaloo, A. R., Dehestani, M., & Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*, 28(12), 2472–2482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.015>

- Kim, H. K., & Lee, H. K. (2010). Acoustic absorption modeling of porous concrete considering the gradation and shape of aggregates and void ratio. *Journal of Sound and Vibration*, 329(7), 866–879. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.10.013>
- Kim, K. W., Jeong, G. C., Yang, K. S., & Sohn, J. yeul. (2009). Correlation between dynamic stiffness of resilient materials and heavyweight impact sound reduction level. *Building and Environment*, 44(8), 1589–1600. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.10.005>
- Kosała, K. (2019a). Calculation models for analysing the sound insulating properties of homogeneous single baffles used in vibroacoustic protection. *Applied Acoustics*, 146, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.11.012>
- Kosała, K. (2019b). Sound insulation properties of two-layer baffles used in vibroacoustic protection. *Applied Acoustics*, 156, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.07.028>
- Kosała, K., Majkut, L., & Olszewski, R. (2020). Experimental study and prediction of insertion loss of acoustical enclosures. *Vibrations in Physical Systems*, 31(2), 1–8.
- Kovler, K., & Roussel, N. (2011). Properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 775–792. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.009>
- Kurra, S., & Ardit, D. (2001). Determination of sound transmission loss of multilayered elements Part 1: Predicted and measured results. *Acta Acustica United with Acustica*, 87(5), 582–592.
- Lee, C. M., & Xu, Y. (2009). A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials. *Journal of Sound and Vibration*, 326(1–2), 290–301. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.04.037>
- Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4294–4298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005>
- Liu, P. S., & Chen, G. F. (2014). Application of Porous Metals. *Porous Materials*, 113–188. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-407788-1.00003-4>
- London, A. (1950). Transmission of reverberant sound through double walls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 270–279. <https://doi.org/10.1121/1.1906601>
- Long, M. (2014). Sound transmission loss. *Architectural Acoustics*, 345–382. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398258-2.00009-X>
- Lung, T. Y., & Doige, A. G. (1983). A time-averaging transient testing method for acoustic properties of piping systems and mufflers with flow. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 73, 867–876. <https://doi.org/10.1121/1.389056>
- Mangili, I., Lasagni, M., Huang, K., & Isayev, A. I. (2015). Modeling and optimization of ultrasonic devulcanization using the response surface methodology based on central composite face-centered design. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 144, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2015.03.003>
- Medina, N. F., Garcia, R., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., & Raffoul, S. (2018). Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in

- construction. In *Construction and Building Materials*, 188(10), 884–897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.069>
- Mendis, A. S. M., Al-Deen, S., & Ashraf, M. (2018). Flexural shear behaviour of reinforced crumbed rubber concrete beam. *Construction and Building Materials*, 166(30), 779–791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.150>
- Meysami, M., Tzoganakis, C., Mutyala, P., Zhu, S. H., & Bulsari, M. (2017). Devulcanization of scrap tire rubber with supercritical CO₂: A study of the effects of process parameters on the properties of devulcanized rubber. *International Polymer Processing*, 32(2), 183–193. <https://doi.org/10.3139/217.3290>
- Meysami, Mohammad. (2012). *A Study of Scrap Rubber Devulcanization and Incorporation of Devulcanized Rubber into Virgin Rubber Compounds*. 216. <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/6609>
- Mohammed, B. S., Anwar Hossain, K. M., Eng Swee, J. T., Wong, G., & Abdullahi, M. (2012). Properties of crumb rubber hollow concrete block. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.035>
- Molanorouzi, M., & Mohaved, S. O. (2016). Reclaiming waste tire rubber by an irradiation technique. *Polymer Degradation and Stability*, 128, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.009>
- Mulholland, K. A., Parbrook, H. D., & Cummings, A. (1967). The transmission loss of double panels. *Journal of Sound and Vibration*, 6(3), 324–334. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(67\)90205-2](https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90205-2)
- Munjal, M. L., & Doige, A. G. (1990). Theory of a two source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element. *Journal of Sound and Vibration*, 141(2), 323–333. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(90\)90843-O](https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90843-O)
- Nacif, G. L., Panzera, T. H., Strecker, K., Christoforo, A. L., & Paine, K. (2013). Investigations on cementitious composites based on rubber particle waste additions. *Materials Research*, 16(2). <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000177>
- Najim, K. B., & Hall, M. R. (2012). Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Construction and Building Materials*, 27(1), 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.013>
- Oliazadeh, P., Farshidianfar, A., & Crocker, M. J. (2018). Experimental and analytical investigation on sound transmission loss of cylindrical shells with absorbing material. *Journal of Sound and Vibration*, 434, 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.07.017>
- Oliazadeh, P., Farshidianfar, A., & Crocker, M. J. (2019). Study of sound transmission through single- and double-walled plates with absorbing material: Experimental and analytical investigation. *Applied Acoustics*, 145, 7–24. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.09.014>
- Oliazadeh, P., Farshidianfar, A., & Crocker, M. J. (2022). Experimental study and analytical modeling of sound transmission through honeycomb sandwich panels using SEA method. *Composite Structures*, 280(November 2021), 114927. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114927>

- Panneton, R., & Atalla, N. (1996). Numerical prediction of sound transmission through finite multilayer systems with poroelastic materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 346–354. <https://doi.org/10.1121/1.415956>
- Pipilikaki, P., Katsioti, M., Papageorgiou, D., Fragoulis, D., & Chaniotakis, E. (2005). Use of tire derived fuel in clinker burning. *Cement and Concrete Composites*, 27(7–8), 843–847. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.03.009>
- Poblet-Puig, J., Rodríguez-Ferran, A., Guigou-Carter, C., & Villot, M. (2009). The role of studs in the sound transmission of double walls. *Acta Acustica United with Acustica*, 95(3), 555–567(13). <https://doi.org/10.3813/AAA.918176>
- Salissou, Y., & Panneton, R. (2009). A general wave decomposition formula for the measurement of normal incidence sound transmission loss in impedance tube. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4), 2083–2090. <https://doi.org/10.1121/1.3081504>
- Saputra, R., Walvekar, R., Khalid, M., Mubarak, N. M., & Sillanpää, M. (2021). Current progress in waste tire rubber devulcanization. *Chemosphere*, 265, 129033. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129033>
- Sgard, F. C., Atalla, N., & Nicolas, J. (2000). A numerical model for the low frequency diffuse field sound transmission loss of double-wall sound barriers with elastic porous linings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108, 2865–2872. <https://doi.org/10.1121/1.1322022>
- Sharp, B. H. (2007). Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering*, 11(2), 53–63(11). <https://doi.org/10.3397/1.2832099>
- Shen, W., Shan, L., Zhang, T., Ma, H., Cai, Z., & Shi, H. (2013). Investigation on polymer-rubber aggregate modified porous concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 667–674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.006>
- Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 67, Part B, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>
- Sienkiewicz, M., Janik, H., Borzędowska-Labuda, K., & Kucińska-Lipka, J. (2017). Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review. *Journal of Cleaner Production*, 147, 560–571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.121>
- Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*, 32(10), 1742–1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>
- Su, H., Yang, J., Ling, T. C., Ghataora, G. S., & Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91(15), 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Tao, Z., & Seybert, A. F. (2003). A review of current techniques for measuring muffler transmission loss. *SAE Technical Paper Series 2003-01-1653*. <https://doi.org/10.4271/2003-01-1653>

Tatangelo, V., Mangili, I., Caracino, P., Anzano, M., Najmi, Z., Bestetti, G., Collina, E., Franzetti, A., & Lasagni, M. (2016). Biological devulcanization of ground natural rubber by *Gordonia desulfuricans* DSM 44462T strain. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(20), 8931–8942. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7691-5>

Theocharis, G., Richoux, O., García, V. R., Merkel, A., & Tournat, V. (2014). Limits of slow sound propagation and transparency in lossy, locally resonant periodic structures. *New Journal of Physics*, 16. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/9/093017>

Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1323–1333. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>

Uygunoğlu, T., & Topçu, I. B. (2010). The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1141–1150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.027>

Vahdatbin, M., & Jamshidi, M. (2022). Using chemical agent in microwave assisted devulcanization of NR/SBR blends: An effective recycling method. *Resources, Conservation and Recycling*, 179(August 2021), 106045. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106045>

Van den Wyngaert, J. C. E., Schevenels, M., & Reynders, E. P. B. (2018). Predicting the sound insulation of finite double-leaf walls with a flexible frame. *Applied Acoustics*, 141, 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.06.020>

Vigran, T. E. (2010). Sound insulation of double-leaf walls - Allowing for studs of finite stiffness in a transfer matrix scheme. *Applied Acoustics*, 71(7), 616–621. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.02.003>

Wang, D. W., & Ma, L. (2017). Sound transmission through composite sandwich plate with pyramidal truss cores. *Composite Structures*, 164, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.088>

Wang, W., Hao, K., Guo, X., Liu, F., Xu, Y., Guo, S., Bai, L., Liu, G., Qu, L., Liu, M., Guo, L., & Liu, H. (2023). Mechano-chemical rubber reclamation using aminolysis products of waste flexible polyurethane foams as the devulcanizing agent. *Journal of Cleaner Production*, 384(October 2022), 135421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135421>

Wang, Y. Z., & Ma, L. (2021). Sound insulation performance of membrane-type metamaterials combined with pyramidal truss core sandwich structure. *Composite Structures*, 260(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113257>

Wang, Z., Pan, C., Hu, Y., Zeng, D., Huang, M., & Jiang, Y. (2022). High-quality ground tire rubber production from scrap tires by using supercritical carbon dioxide jet pulverization assisted with diphenyl disulfide. *Powder Technology*, 398, 117061. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117061>

Wang, Z., & Zeng, D. (2021). Preparation of devulcanized ground tire rubber with supercritical carbon dioxide jet pulverization. *Materials Letters*, 282, 128878. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128878>

- Winoto, V., & Yoswathana, N. (2019). Optimization of biodiesel production using nanomagnetic CaO-based catalysts with subcritical methanol transesterification of rubber seed oil. *Energies*, 12(2), 230. <https://doi.org/10.3390/en12020230>
- Wiśniewska, P., Wang, S., & Formela, K. (2022). Waste tire rubber devulcanization technologies: State-of-the-art, limitations and future perspectives. *Waste Management*, 150(July), 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.002>
- Wu, Q., Fang, J., Zheng, M., Luo, Y., Wang, X., Xu, L., & Zhang, C. (2019). Morphology evolution and rheological behaviors of PP/SR thermoplastic vulcanizate. *Polymers*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.3390/POLYM11010175>
- Yang, X. H., Kang, Y., Xie, X., Zhang, Q., & Shangguan, W. Bin. (2023). Multilayer coupled plate-type acoustic metamaterials for low-frequency broadband sound insulation. *Applied Acoustics*, 209, 109399. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109399>
- Yu, X., Lu, Z., Cheng, L., & Cui, F. (2017). Vibroacoustic modeling of an acoustic resonator tuned by dielectric elastomer membrane with voltage control. *Journal of Sound and Vibration*, 387, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.10.022>
- Zarastvand, M. R., Ghassabi, M., & Talebitooti, R. (2022). Prediction of acoustic wave transmission features of the multilayered plate constructions: A review. In *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 24(1). <https://doi.org/10.1177/1099636221993891>
- Zergoune, Z., Ichchou, M. N., Bareille, O., Harras, B., Benamar, R., & Troclet, B. (2017). Assessments of shear core effects on sound transmission loss through sandwich panels using a two-scale approach. *Computers and Structures*, 182, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.11.017>
- Zhang, B., & Poon, C. S. (2018). Sound insulation properties of rubberized lightweight aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3176–3185. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.044>
- Zhou, R., & Crocker, M. J. (2010). Sound transmission loss of foam-filled honeycomb sandwich panels using statistical energy analysis and theoretical and measured dynamic properties. *Journal of Sound and Vibration*, 329(6), 673–686. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.10.002>
- Zhu, H., Rong, B., Xie, R., & Yang, Z. (2018). Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 164, 644–654. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.001>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vilniškis, T., & Januševičius, T. (2024). Research of insertion loss of multilayered construction with devulcanized rubber. *Environmental and climate technologies*, 28(1), 120–134. doi:10.2478/rtuct-2024-0011

Vilniškis, T., & Januševičius, T. (2024). Sound insulation properties of sound-reduction louvers with innovative devulcanized rubber. *Archives of Acoustics*, 1-10, <https://doi.org/10.24425/aoa.2024.148789>

Vilniškis, T., & Januševičius, T. (2023). Experimental research and transfer matrix method for analysis of transmission loss in multilayer constructions with devulcanized waste rubber. *Sustainability: Efficient Use and Recovery of Resources for the Purpose of Circular Economy and Sustainability*, 15(17), 1–21. doi: 10.3390/su151712774

Vilniškis, T., Januševičius, T., & Baltrėnas, P. (2020). Case study: Evaluation of noise reduction in frequencies and sound reduction index of construction with variable noise isolation. *Noise Control Engineering Journal*, 68(3), 199–208. DOI: 10.3397/1/376817

Straipsniai kituose leidiniuose

Vilniškis, T., & Januševičius, T. (2023) Modelling of sound reduction of sound insulating enclosure with recycled rubber covered wall. In *12th International conference "Environmental Engineering"*, 27-28 April 2023, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 1–9. doi: 10.3846/enviro.2023.915

Patentai

Vilniškis, T., Januševičius, T. (2019). *Triukšmą mažinančios ir orą praleidžiančios žaliuzės, padengtos gumos granulatu* (Lietuvos patentas Nr. 6593).

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

With the development of the automobile industry, the amount of manufactured tires is increasing every year. The main problem is how to properly dispose of used tires. Currently, much attention is paid to the devulcanization of tire rubber to restore waste rubber to its original state, where new rubber products can be made from it. For the devulcanization process, obtaining rubber granules free of additional textile, metal, and other impurities is especially important. Such rubber granules can be used not only for producing new rubber products but also for creating other products.

One new way of using rubber waste is rubber granule panels, which can be used to pave children's playgrounds, to dampen vibrations caused by equipment or to create sound-insulating or absorbing panels.

The work deals with the problem of sound insulation using rubber granule panels, creating multilayer constructions when rubber granules are additionally combined with plasterboard panels.

Considering the acoustic properties of rubber granule panels, light, thin structures are created, which can be used to reduce the noise emitted by devices. The noise of equipment propagating in the environment is a big concern. Various operating devices inside and outside buildings, diesel generators at fairs, or open marketplaces generate high noise levels that often exceed the existing background

noise level, so it is especially important to find ways to apply appropriate noise reduction solutions.

Relevance of the dissertation

As the industry develops, sound-emitting devices are installed inside and outside buildings to ensure people's comfort. Various industrial equipment, ventilation chambers, air coolers, and electric generators emit unwanted noise in the environment, which often exceeds the existing background noise level. Therefore, nowadays, it is relevant to find sound insulation solutions with light and thin structures, the sound insulation efficiency of which would be as high as possible. Materials made from recycled waste can also be used to create such constructions. One of the solutions is recycling used tires to create rubber panels, which could be combined with other materials to create thin, sound-insulating structures.

Tire waste is difficult to recycle, as it requires enormous resources, and the applied recycling methods lead to environmental pollution. Therefore, their reuse following the circular economy principles is particularly relevant. However, to use these materials for sound insulation and absorption, it is necessary to determine how to transform them into products suitable for practical use. Some scientists are studying how to use waste in concrete structures, replacing natural resources with waste (Batayneh et al., 2007; Karakurt, 2015; Khaloo et al., 2008; Nacif et al., 2013; Zhu et al., 2018). Sufficient work has been done to investigate how waste changes the sound insulation and absorption properties of structures (Corredor-Bedoya et al., 2017; Herrero et al., 2013; Mohammed et al., 2012; Zhang & Poon, 2018).

However, it is worth noting that many works are concentrated on the immobilization of tire waste in concrete structures. The creation of structures using only tire rubber, connecting their components into panels, and examining the physical, chemical, and acoustic properties of the structures has not been sufficiently studied; therefore, it is relevant to carry out scientific research in this field.

This work aims to create panels of rubber granules by bonding them with resins and hardeners. Sound-insulating multilayer constructions are obtained by combining rubber granule panels with plasterboard panels. Considering their acoustic properties, the structures can be used for sound-insulating solutions designed to reduce the noise emitted by the devices.

Object of the research

The object of the research is panels made of recycled tire rubber granules and sound-absorbing and insulating constructions created from them.

Aim of the dissertation

Based on the results of theoretical and numerical modelling and experimental research, to develop a sound-absorbing and insulating rubber granule board and a sound-insulating enclosure for reducing equipment noise.

Tasks of the dissertation

To achieve the aim, the following tasks had to be solved:

1. To create rubber granule panels and perform experimental studies of their physical and sound absorption properties by changing the ratio of the fractions of rubber granules using polyurethane glue.
2. To create sound-insulating constructions with rubber granule panels and investigate their insertion loss and sound transmission loss.
3. To perform theoretical modelling of the sound insulation of constructions, depending on the thickness of the rubber granule panels, using the transfer matrix method.
4. To create a sound-insulating enclosure based on experimental and theoretical studies and evaluate its effectiveness in reducing equipment noise by modelling.

Research Methodology

Experimental laboratory methods of sound absorption coefficient (α) and sound transmission loss (TL) of materials were applied in the work using an impedance tube. The methods are based on the standards ISO 10534-2 and ASTM E2611-17, respectively. The insertion loss measurements of larger diameter samples (300 x 300 mm) were performed in an anechoic chamber on a specially constructed stand.

The theoretical transfer matrix method and numerical modelling of structures using the INSUL program were used to predict the results of experimental research. The sound insulation performance of the sound-insulating enclosure was modelled using Odeon software.

Scientific novelty of the dissertation

Sound-insulating or absorbing rubber granule panels were created using different fractions of chemically devulcanized rubber granules, glueing them together with polyurethane glue. Flow resistivity, dynamic stiffness, density, sound transmission loss and sound absorption of the panels were characterized. Based on theoretical and experimental research, the sound-insulating construction was designed to reduce the noise of devices.

Practical value of the research findings

The use of rubber granules made from used tires in soundproofing structures can contribute to the reduction of tire waste. Compared to other commonly used materials (mineral wool and foam), rubber granule panels are stronger but have similar acoustic properties. Due to its dynamic properties and vibration damping, rubber panels are suitable for creating multilayer constructions when rubber granule panels are combined with plasterboard or alternative panels. This makes it possible to create a thin, sound-insulating structure that can be used to create sound-insulating structures.

Multilayer constructions can be used to create special sound-insulating enclosures to reduce the noise level emitted by the devices. To ensure proper ventilation of the device,

special louver structures were additionally developed, in which rubber can be used as a sound-absorbing material.

Defended statements

1. By using >50% of chemically devulcanized rubber granules in the composition of the rubber granule panel, optimal flow resistivity values (80–95 kPa*s/m²) were achieved, which ensured the highest sound absorption values.
2. In constructions with 15 mm rubber granule panels, increasing the amount of a small fraction of rubber granules in the panel by 25% increases its density to 2.5%, and the sound transmission reduction values increase to 1.0 dB.
3. In constructions with 50 mm rubber granule panels, reducing the amount of small fraction rubber granules in the panel by 25%, its dynamic stiffness decreases to 5.3%, and the sound transmission reduction values increase to 0.8 dB.
4. In the sound-insulating enclosure, construction of which 50 mm rubber granule panels were used when the panels are tilted at an angle of 45°, the sound pressure level is reduced to 10 dB.

Approval of the research findings

Five scientific articles were published on the subject of the dissertation: four in scientific journals listed in *Clarivate Analytics Web of Science* (Vilniškis, Januševičius, 2023a, 2024a, 2024b; Vilniškis et al. 2020) and one in other databases referenced in peer-reviewed scientific journals (Vilniškis, Januševičius, 2023). A patent was received in the Republic of Lithuania for “Noise-reducing louvres covered with rubber granules”, patent No. LT 6593 (Vilniškis & Januševičius, 2019)

The results of the research conducted in the dissertation were publicized at four conferences.

- Conference of young scientists “Science – the Future of Lithuania, Environmental protection engineering”, 2021, Vilnius, Lithuania.
- International conference “Deutsche Kautschuk-Tagung and International Rubber Conference DKT IRC 2021”, 2022, Nuremberg, Germany.
- International conference “Conference of Environmental and Climate Technologies”, 2023, Riga, Latvia.
- International conference “Environmental Engineering”, 2023, Vilnius, Lithuania.

The dissertation was presented on 19 February 2024 at Kaunas University of Technology during the seminar of the Faculty of Technology and Business in Panevėžys.

Structure of the dissertation

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

The dissertation has 169 pages; the text contains 77 numbered formulas, 96 figures, and nine tables. In total, 109 literature sources were used in writing the dissertation.

1. Analysis of research on the use of rubber granules for noise reduction and sound propagation

The scientific literature mostly focuses on the use of rubber granules in concrete. Waste rubber is attractive because it can be used to create lighter structures. The density of mineral materials, such as sand or gravel, ranges from 1600 to 2080 kg/m³, while the density of rubber granules ranges from 640 to 720 kg/m³ (Gerges et al., 2018). For this reason, the use of rubber waste is very relevant in concrete products. By increasing the amount of rubber granules in concrete, its compressive strength decreases because, due to its properties, rubber has a worse adhesion to the binder (Khaloo et al., 2008; Karakurt, 2015; Ganjian et al., 2009). It was also found that by reducing the size of rubber particles in concrete mixtures, the compressive strength can be increased (Su et al., 2015; Nacif et al., 2013). The use of rubber granules is also relevant when creating overlay structures. They can be used to create lightweight overlay panels, and the elastic properties and acoustic properties of rubber granules improve the impact sound insulation results of overlays (Zhang et al., 2018).

One of the most attractive methods of rubber processing is devulcanization. The main methods of devulcanization are primary grinding, chemical, ultrasonic, microwave, biological, and thermomechanical devulcanization in supercritical CO₂ (Asaro et al., 2018). During the devulcanization process, the cross-links between S-S (sulfur-sulfur) and C-S (carbon-sulfur) are broken in order not to damage the main chain C-C. When evaluating the entire devulcanization process, including the amount of energy required to break S-S and C-S bonds, energy consumption can reach up to 2.5 kWh/kg (Dobrotă et al., 2019).

Thin sound-insulating structures are made from created multilayer structures consisting of panels of different densities, strengths, and dynamic properties. When creating multilayer systems, different materials can be used to create combinations to ensure the highest possible sound insulation. The main principle of such constructions is that the greater the mass, the better the sound insulation. Different panels have different resonant frequencies due to their dynamic mechanical properties. When designing multilayer structures, attention is paid to their weight, so traditional materials, such as metal panels and fiber panels from mineral wool, are commonly used (Hassani et al., 2021; Ehsan, Samaei et al., 2021). The literature mostly focuses on homogeneous materials, such as steel, aluminium, and organic glass, and their combinations with mineral wool (Kosała et al., 2020).

Researchers are determining the most appropriate modelling methods for multilayer structures. Some of the most famous theoretical models are described by Cremer et al. (2005), London (1950), Sharp (2007), Brekke (1981), Davy (2009), and Brunkskog (2012). Most methods are based on mass law. The mass law model is particularly important for homogeneous single structures because despite the resonant frequencies that reduce the sound insulation at critical frequencies; the sound insulation properties of such

partitions can be easily estimated. Sound-insulating structures can be divided into single and double structures. Single-layer constructions are those that contain one or more different layers of materials, but they are firmly connected to each other and do not have an air gap. Meanwhile, double structures consist of two layers that are separated from each other by an air gap.

2. Methodology of experimental studies of physical and acoustic properties of constructions with rubber granule panels and numerical modelling of a sound-insulating enclosure

Rubber granule panels were produced using rubber granules of three different fractions:

- small fraction rubber granules (0.6–2.0 mm);
- large fraction of rubber granules (2.0–5.0 mm);
- chemically devulcanized rubber granules (0.6–4.0 mm).

Using different rubber fractions, 15 different rubber panels were produced, changing the ratio of fractions every 25%. Rubber granules were mixed with polyurethane resin and hardener in the production of rubber granule panels. The amounts of polyurethane resin and hardener were the same in all cases, i.e., 40% of the mass of the rubber panel. Samples of rubber granules of three different thicknesses were produced: 15 ± 2 , 25 ± 2 , and 50 ± 2 mm.

Density, dynamic stiffness, and air resistance tests were carried out to determine the physical properties of rubber granule panels. Dynamic stiffness tests were performed according to the standard ISO 9052-1:1989 “*Acoustics – Determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings*”.

The method used to determine flow resistivity was based on the standard ISO 9053-1 “*Acoustics – Determination of airflow resistance –Part 1: Static airflow method*”. A test set-up consisting of a laminar airflow tube, an air compressor, and a sample holder was used to determine the flow resistivity. The length of the standpipe was 120 cm to ensure laminar airflow. The inner diameter of the pipe was 30 mm. The sample holder was perforated, the open area of which was 50 %; a sample with a diameter of 30 mm was installed in the sample holder (Figure S2.1).

Experimental studies of sound absorption (Fig. S2.2) and sound transmission loss (Figure S2.3) of materials were carried out with an impedance tube.

Sound absorption tests are performed based on the standard ISO 10534-2:2023 “*Acoustics – Determination of acoustic properties in impedance tubes – Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance*”.

Sound transmission loss experiments are performed based on the standard ASTM E2611-17 “*Standard test method for normal incidence determination of porous material acoustical properties based on the transfer matrix method*”.

Theoretical calculations of sound insulation indicators were performed using the transfer matrix function method, which is based on the acoustic properties of materials. The main calculated parameters were the acoustic impedance of materials and the

wavelength, which were measured by an impedance tube. Based on the results of experimental and theoretical research, it is possible to predict the sound insulation of structures, and based on them, an enclosure can be created and modeled to reduce the noise of devices.

A sound-insulating enclosure was designed and verified by numerical simulation in the work, the side walls of which consisted of the sound-insulating structures with gypsum board panels (GKFI) and rubber granule panels (thickness 25 and 50 mm) examined in the work. The back walls of the enclosure were equipped as a louver structure to ensure proper ventilation of the device.

The structural performance of the back walls was first measured under laboratory conditions in a semi-anechoic chamber to assess the performance of the structure. During the research, the insertion loss studies were carried out by examining the louver structure, which consisted of seven metal panels covered with sound-absorbing materials (mineral wool, polystyrene foam and three different panels of rubber granules).

Numerical modelling was carried out using the Odeon program, creating a 3D model of the soundproof enclosure. During simulation, the sound pressure level values were calculated at a distance of 1–5 m from the enclosure on X (1–5 measurement points) and Y axis (6–10) measurement points.

3. Results of experimental, numerical, and theoretical modelling studies

During the work, 15 rubber granule panels with different granulometric compositions were produced, and their physical and acoustical properties were investigated.

When increasing the amount of a large fraction in the mixture every 25%, the sound absorption values decreased (Fig. S3.1). Dependencies were also confirmed by the determination coefficient (R^2), where 15 mm rubber granule panel's $R^2 = 0.738$ ($p = 0.0000415$), 25 mm rubber granule panel's $R^2 = 0.748$ ($p = 0.0000319$), and 50 mm rubber granule panel's $R^2 = 0.802$ ($p = 0.00000644$). Evaluating the results according to the regression curve formula, increasing the amount of large fraction by 25%, the average sound absorption of 15 ± 2 mm thick rubber panels decreased by 9.8%, and for 25 ± 2 mm panels, it decreased by 8.4%, while the sound absorption of 50 ± 2 mm thick panels, it decreased by 9.6 %.

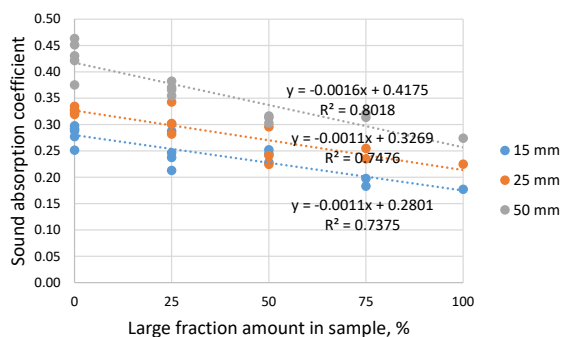


Fig. S3.1. Dependence of the average sound absorption coefficient on the amount of large fraction (%) in the mixture

When increasing the amount of a small fraction in the mixture every 25% (Figure S3.8), the sound absorption values increased, but there were no clearly expressed linear dependencies since the coefficient of determination values were $R^2 < 0.25$, $p > 0.05$.

When increasing the amount of chemically devulcanized fraction in the mixture every 25% (Figure S3.2), the sound absorption values increased. Determination values with 15 mm rubber granule panels equalled $R^2 = 0.357$ ($p = 0.0187$); for 25 mm rubber granule panels, they were $R^2 = 0.369$ ($p = 0.0163$), and for 50 mm rubber granule panels, $R^2 = 0.338$ ($p = 0.0229$). Evaluating the results according to the regression curve formula, after increasing the amount of chemically devulcanized fraction by 25%, the average sound absorption of 15 ± 2 mm thick samples increased by 7.9%, the sound absorption of 25 ± 2 mm samples increased by 7.6%, and for the 50 ± 2 mm thick samples, it increased by 7.6%.

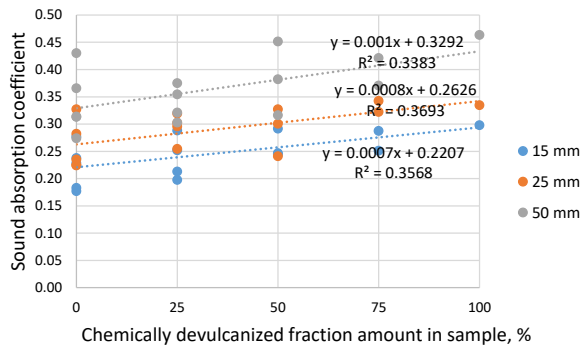


Fig. S3.2. Dependence of the average sound absorption coefficient on the amount of chemically devulcanized fraction (%) in the mixture

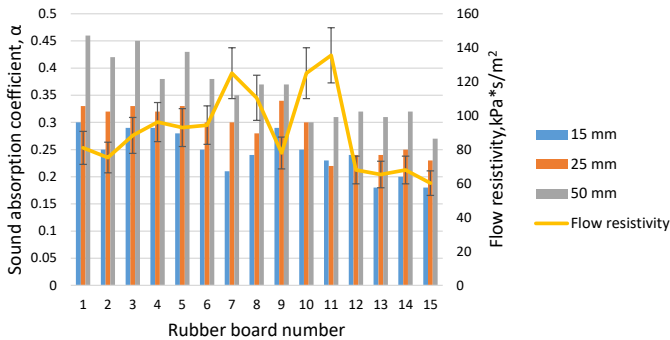


Fig. S3.3. Dependence of the average sound absorption coefficient on the flow resistivity of the rubber granule plate

When evaluating the dependence of sound absorption of rubber granule panels on their air resistance (Figure S3.3), it was found that rubber granule panels with flow resistivity results from 80 to 95 $\text{kPa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ had higher sound absorption results, and this was the optimal air resistance parameter for rubber granule boards.

Sound transmission loss studies with an impedance tube were performed with constructed 15, 25, and 50 rubber granule panels and plasterboard panels (GKB and GKFI) on both sides.

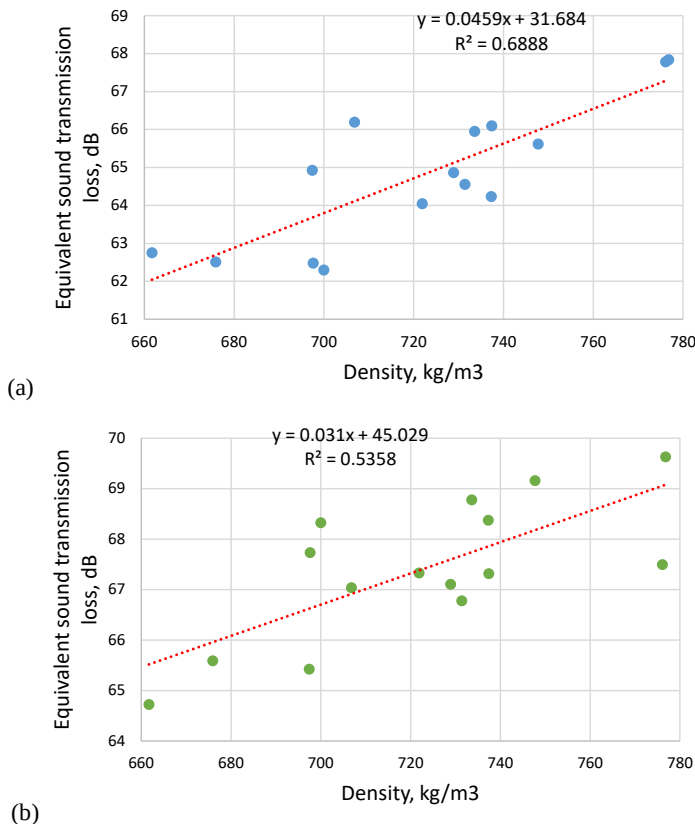


Fig. S3.4. Dependence of the equivalent sound transmission loss results on the density of the rubber granule board. (a) – construction with a 15 mm rubber granule panel; (b) – construction with a 25 mm rubber granule panel

When evaluating the sound transmission loss of constructions with rubber granule panels depending on the density, it was found that the values of the sound transmission loss increased with increasing the density of the rubber sample. According to Figure S3.4, the construction with 15- and 25-mm thick rubber granule samples had a linear dependence; the determination coefficients (R^2) were equal to 0.689 ($p = 0.000129$) and 0.536 ($p = 0.00192$), respectively, while the determination coefficient of the construction with 50 mm thick rubber panels was $R^2 < 0.25$, $p = 0.342$. When analyzing the results according to the formula of the regression curve, it can be stated that in constructions with

15- and 25-mm rubber samples, increasing the density of the rubber sample to 30 kg/m³, the sound transmission loss values increased in both cases by 1.3 dB and 1.0 dB.

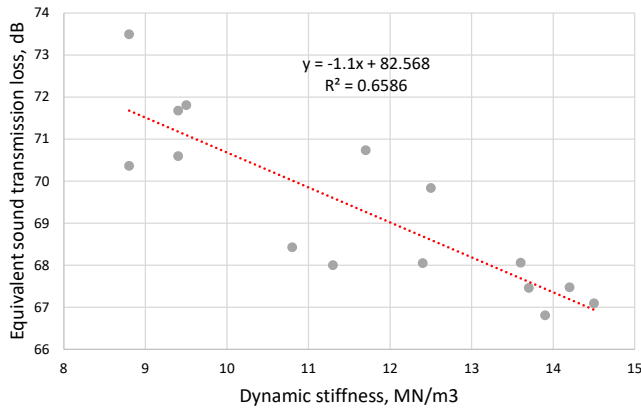


Fig. S3.5. Dependence of the equivalent sound transmission loss results in the dynamic stiffness of the rubber granule board. Constructions with 50 mm rubber granule panel

Analyzing the sound transmission loss depending on the dynamic stiffness (Fig. S3.5), no linear dependence was found between the dynamic stiffness and the sound transmission loss when evaluating the constructions with 15 mm and 25 mm thick rubber granule panels, the coefficient of determination $R^2 < 0.25$, $p > 0.05$. Meanwhile, in the constructions with a 50 mm thick rubber granule plate, a linear dependence was found, and the determination coefficient (R^2) reached 0.659, $p = 0.000240$. Increasing the dynamic stiffness of the rubber granule panel by 2 MN/m³, sound transmission loss of constructions with a 50 mm thick rubber granule board decreased by 2.2 dB.

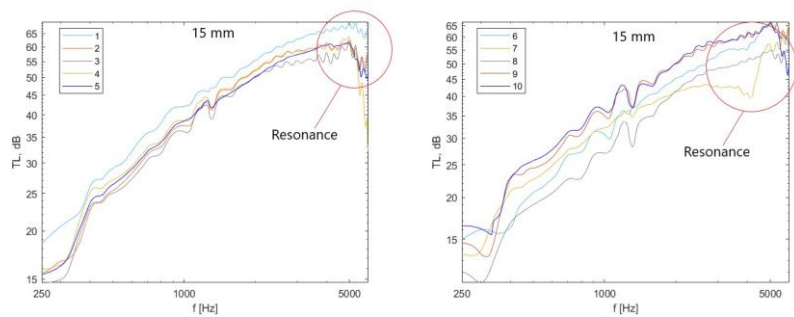


Fig. S3.6. To be continued

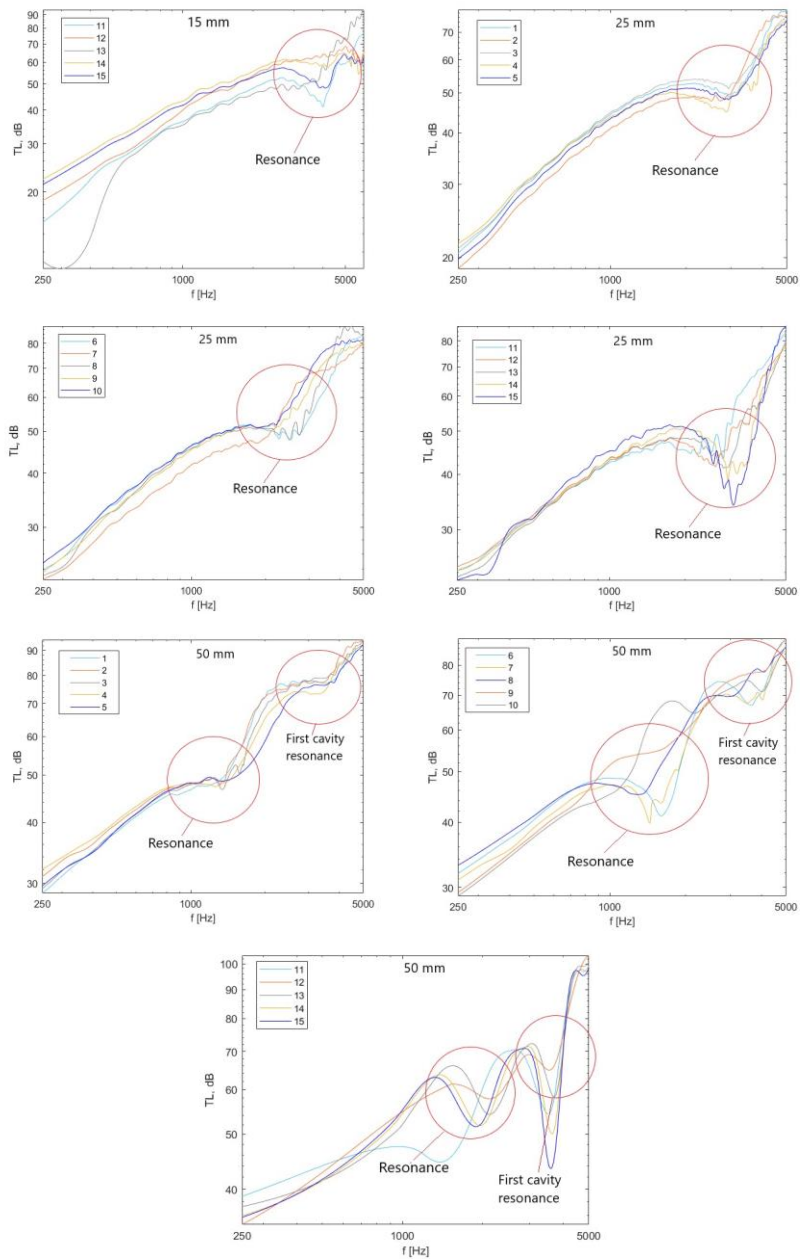


Fig. S3.6. Results of theoretical modelling of sound transmission loss based on the transfer matrix method

Analyzing the simulation results with rubber samples 15 mm thick at low frequencies from 250 Hz to 1250 Hz, the sound transmission reduction values calculated by the theoretical model rose according to the mass law up to the resonant frequency. A layer of 15 mm of porous media was thin enough to set the resonance at 4000 Hz (Fig. S3.6).

As the layer of porous medium increased to 25 mm, the resonant frequency shifted down. In structures with 25 mm thick rubber granule samples, the resonant frequency was set at 2500–3000 Hz.

After doubling the thickness of the porous medium to 50 mm, the resonant frequency appeared at 2000 Hz. However, due to resonant modes, an additional resonance occurred between the two plates, which caused a series of air cavity resonances. In this case, the second resonance occurred at 3500–4000 Hz.

Numerical simulation of the sound-insulating enclosure was performed using Odeon software. The 3D model of the enclosure was created using Sketchup software. During the simulation, the sound pressure level values were calculated at a distance of 1–5 m from the enclosure on X- (1–5 receiver points) and Y-axis (6–10) receiver points.

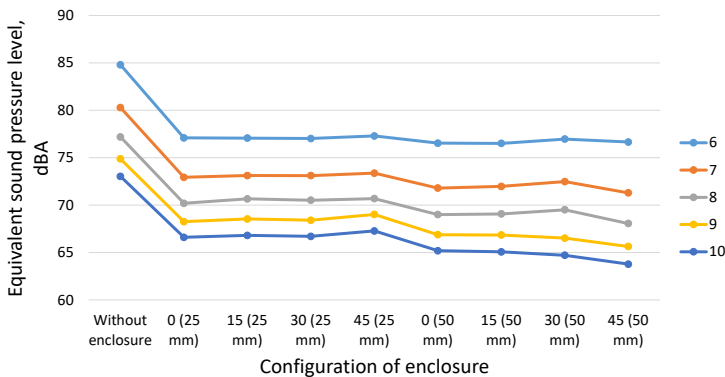


Fig. S3.7. Equivalent sound pressure level at receiver points on the Y-axis with each enclosure configuration

On the Y-axis at points 6–10 (Figure S3.7), the sound pressure levels did not depend on the angle of the louvre plates. The difference in sound insulation depended only on the construction of the side wall. A side wall with a 50 mm thick rubber granule panel reduced the sound pressure level by 2 dB better than a structure with a 25 mm thick rubber panel.

On the X-axis, where there were measurement points 1–5 (Fig. S3.8), the sound pressure levels depended on the enclosure configuration. When the tilt angle of the back plates increased, the sound pressure values decreased. At a distance of 5 meters, changing the angle of inclination of the plate by 15 degrees, the sound pressure level decreased to 4 dB. The difference in sound pressure level reached up to 12 dB when the panels were in a horizontal position and tilted at an angle of 45°. In some cases, the panels acted as resonators, resulting in higher sound pressure values. At measurement points 2, 4, and 5, when the plates were in a horizontal position and covered with a 25 mm rubber pellet

plate, the equivalent sound pressure values were 3–4 dB higher compared to the sound pressure level values when the hood was not installed. When the plates were tilted 15°, 30°, and 45°, the equivalent sound pressure level values decreased with increasing plate tilt angle. Similar results were obtained using a 50 mm thick rubber pellet board.

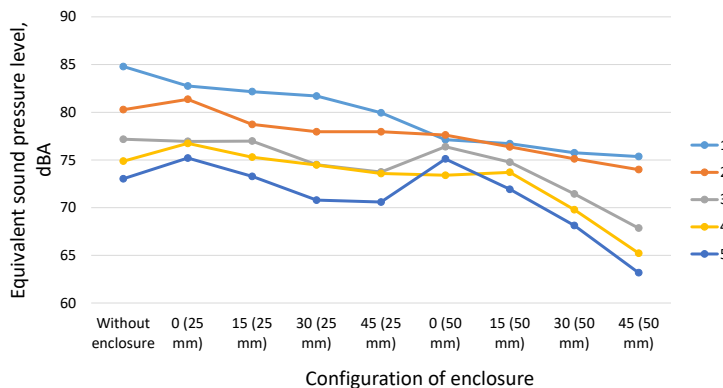


Fig. S3.8. Equivalent sound pressure level at receiver points on the X-axis with each enclosure configuration

In summary of the simulation results, a dependence on the angle of inclination of the plates was found: the higher the angle of inclination, the better the sound attenuation. This was because as the angle of the plates increased, there was a larger area of the absorbing material in the sound propagation path, resulting in a better efficiency of the absorbing material. Thicker sound-absorbing material had better sound absorption in a wider frequency range, so the enclosure with the 50mm rubber bead plate had better sound attenuation results. Using 50 mm thick rubber granule panels in the hood structure, the sound pressure level can be reduced to 10 dB at a distance of 5 m.

The principle of operation of the soundproof enclosures is based on sound insulation and absorption (Fig. S3.9). The side walls (2) of the sound-insulating enclosure were made of the sound-insulating constructions with rubber granule panels studied in the dissertation. By changing the thickness of the rubber in the enclosure structure, it is possible to control the sound insulation of the side walls according to the spectrum of the sound power level of the device.

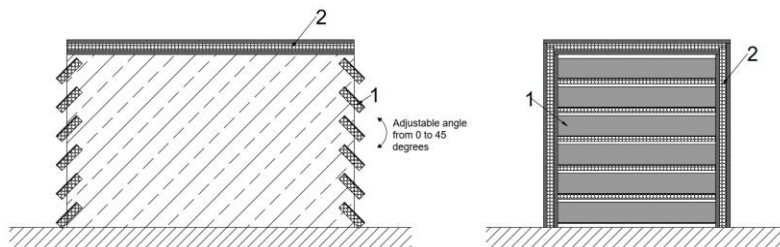


Fig. S3.9. Sound insulating enclosure

To ensure ventilation for the device, the back walls of the enclosure were made as a louvred construction (1) (Fig. S3.13). The principle of the construction is based on the fact that the propagating waves collide with the panels covered with rubber granule panels, which, due to their acoustic properties, absorb part of the propagating noise. The noise that passes through the layer of rubber granules collides with the base plate, which, due to its structure, transmits part of the noise and reflects the other part. The reflected noise is again additionally absorbed by the layer of rubber granules, and the noise level that passes through the metal plate encounters another layer of rubber granules and is absorbed again. Depending on the tilt angle of the plates, the noise level can be reduced up to 12 dB.

General conclusions

1. Experimental studies of the physical properties of rubber granule panels found that the density of the rubber granule panel depends on the amount of small fraction in the panel. Increasing the amount of small fractions by 25% increases the density by 2.3%. Flow resistivity values depend on the amount of chemically devulcanized rubber fraction; increasing fraction by 2% increases flow resistivity by 4.1%. Meanwhile, the dynamic stiffness of the rubber granule board is reduced by 5.3% by reducing the amount of small fraction by 25%.
2. Experimental studies of sound absorption determined that the optimal flow resistivity, with which the highest sound absorption values were achieved, was $80\text{--}95\text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. To ensure this flow resistivity, the rubber granules must contain $\geq 50\%$ chemically devulcanized rubber granules and no more than 25% large and small fraction rubber granules. Also, sound absorption depends on the thickness of the board: 15 mm thick rubber granule boards most effectively absorbed sound of 2000–3150 Hz frequencies, and 25 mm thick rubber granule boards were most effective at 1600–2000 Hz, 50 mm at 800–1000 Hz.
3. Experimental studies of sound transmission loss of constructions with rubber granule panels found that when using thin rubber granule panels of 15 mm and 25 mm thickness, the transmission loss of the construction depends on the mass of the rubber granule panel, increasing the density of the rubber panel by $30\text{ kg}/\text{m}^3$, the sound transmission loss value in both cases increases by 1.3 dB and 1.0 dB, respectively. Meanwhile, when using a thicker 50 mm rubber granule panel, the transmission loss depends on the dynamic properties of the rubber, and increasing the dynamic stiffness of the rubber granule board by $2\text{ MN}/\text{m}^3$ decreases sound transmission loss by 2.2 dB.
4. After measuring the acoustic resistance (Z_f) and wave number ($k_{0,z}$) of the rubber granule sample, it is possible to predict the sound transmission reduction values of multilayer constructions with rubber granule panels. The trends identified after the theoretical modelling are consistent with the results of experimental studies. Resonance frequencies shift to lower frequencies as the thickness of the rubber sample increases. The results of the theoretical study show that when the mass of the construction is increased by 20%, the transmission results increase by about 5 dB over the entire frequency band.

5. Based on the simulation results, a dependence on the tilt angle of the plates was determined: the higher the angle of inclination, the better the sound attenuation. As the angle of the panels increased, there was a larger area of the absorbing material in the sound propagation path, so the effectiveness of the absorbing material was better. The thicker sound-absorbing material had better sound absorption in a wider frequency range, so the enclosure with the 50 mm rubber bead plate had higher sound attenuation results. Comparing the sound attenuation efficiency between the structure with 25 mm and 50 mm rubber granule panels, it can be said that the enclosure with 50 mm rubber reduced the sound pressure level by 3–7 dB better. By using 50 mm thick rubber granule panels in the enclosure construction and tilting the panels at an angle of 45° , the sound pressure level at a distance of 5 m can be reduced to 10 dB.

Recommendation

Based on the experimental and theoretical research conducted on the topic of the dissertation, a sound-insulating enclosure was created. It is recommended that the external walls of the enclosure would be made of GKFI gypsum board and rubber granule board. The back walls of the enclosure are partially open to ensure proper air movement required to ventilate the unit. It is recommended to install the backwall panels in such a way that their angle of inclination can be changed and to cover them with sound-absorbing rubber granule panels. For devices that generate high-frequency sound (>1000 Hz), it is recommended to use constructions with 25 mm thick rubber granule panels, the side walls of which are constructions with 25 mm thick rubber granule panels, the composition of which includes $>50\%$ small fraction rubber granules, and the back plates are covered with rubber granule board containing $>50\%$ chemically devulcanized rubber granules. For units that generate low or medium frequency sound (<1000 Hz), it is recommended to install the side walls using constructions with 50 mm thick rubber granule panels containing $>50\%$ large fraction granules, and to cover the back plates with rubber granule panels containing $>50\%$ chemically devulcanized rubber granules.

Using a sound-insulating enclosure, the noise level emitted by the device can be reduced to 10 dB at a distance of 5 m from the device, depending on the angle of inclination of the panels.

Tomas VILNIŠKIS

KONSTRUKCIJŲ SU DEVULKANIZUOTOS GUMOS GRANULĖMIS
KŪRIMAS IR JŲ AKUSTINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Aplinkos inžinerija (T 004)

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ACOUSTIC PROPERTIES OF
CONSTRUCTIONS WITH DEVULCANIZED RUBBER GRANULES

Doctoral dissertation

Technological sciences,
Environmental Engineering (T 004)

Lietuvių kalbos redaktorė Rita Malikėnienė
Anglų kalbos redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2024 05 06. 15,8 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2024-026-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino UAB „Ciklonas“,
Žirmūnų g. 68, 09124 Vilnius