



**VILNIUS
TECH**

Vilniaus Gedimino
technikos universitetas

Edvinas POCIUS

TECHNOLOGINĖMIS ATLIEKOMIS MODIFIKUOTO BETONO ATSPARUMAS UŽŠALDYMO IR ATŠILDYMO CIKLAMS BEI ŠARMINEI KOROZIJAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (T 008)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Edvinas POCIUS

TECHNOLOGINĖS ATLIEKOMIS
MODIFIKUOTO BETONO ATSPARUMAS
UŽŠALDYMO IR ATŠILDYMO CIKLAMS BEI
ŠARMINEI KOROZIJAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (T 008)

Vilnius, 2026

Disertacija rengta 2021–2026 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Džigita NAGROCKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008).

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

Pirmininkas

doc. dr. Sigitas VĖJELIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008).

Nariai:

dr. Modestas KLIĞYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008),

doc. dr. Hana ŠIMONOVÁ (Brno technikos universitetas, Čekija, Statybos inžinerija – T 002),

prof. dr. Danutė VAIČIUKYNIENĖ (Kauno technologijos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008),

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2026 m. birželio 8 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto *Aula Doctoralis* posėdžių salėje.

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

Tel.: +370 5 274 4956; faksas +370 5 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2026 m. gegužės 7 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 2026-022-M mokslo literatūros knyga

<https://doi.org/10.20334/2026-022-M>

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2026

© Edvinas Pocius, 2026

edvinas.pocius@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Edvinas POCIUS

RESISTANCE OF TECHNOLOGICAL
WASTE-MODIFIED CONCRETE TO
FREEZE–THAW CYCLES AND ALKALINE
CORROSION

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (T 008)

Vilnius, 2026

The doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2021–2026.

Supervisor

Prof. Dr Džigita NAGROCKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

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

Chairman

Assoc. Prof. Dr Sigitas VĖJELIS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Members:

Dr Modestas KLIĞYS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Assoc. Prof. Dr Hana ŠIMONOVÁ (Brno University of Technology, Czech Republic, Civil Engineering – T 002),

Prof. Dr Danutė VAIČIUKYNIENĖ (Kaunas University of Technology, Materials Engineering – T 008),

Prof. Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of the Scientific Field of Materials Engineering in the *Aula Doctoralis* Meeting Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a.m. on 8 June 2026**.

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

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

A notification on the intended defence of the dissertation was sent on 7 May 2026. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Vilnius Gediminas Technical University repository <https://etalpykla.vilniustech.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Darbe tiriamas betonas, modifikuotas stiklo apdirbimo atliekomis, betono šlamu ir kristalizuojančiu priedu. Tikslas – sukurti šalčiui ir šarminiai korozijai atsparų betoną, dalį cemento keičiant stiklo atliekomis, o smėlį – betono šlamu. Parinkus rekomenduojamus technologinių atliekų kiekius, siekiama užtikrinti pagrindines betono savybes, išlaikant betono atsparumą šalčiui ir šarminiai korozijai.

Darbe sprendžiami uždaviniai apima stiklo apdirbimo atliekų ir betono šlamo tyrimus, vertinant jų poveikį cemento akmenis savybėms. Nustačius rekomenduojamus atliekų kiekius, tiriamos modifikuoto betono fizikinės ir mechaninės savybės, ypatingą dėmesį skiriant atsparumui šalčiui ir šarminiai korozijai. Šia tyrimų seka siekiama pagrįsti naujai sukurtos medžiagos pagrindines savybes, atsparumą šalčiui ir šarminiai korozijai.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros šaltinių sąrašas, autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir santrauka anglų kalba.

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

Pirmame skyriuje aptariamos aktyvios mineralinės medžiagos, jų susidarymas ir panaudojimas betono gamyboje. Aptariamas betono šlamo bei stiklo atliekų susidarymas ir jų naudojimo poveikis betono fizikinėms, mechaninėms savybėms, ilgaamžiškumui. Taip pat aprašomas modifikuotų atliekomis betonų ilgaamžiškumas, CO₂ emisijos vertinimas. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikiamos tyrimo metu naudotos medžiagos, aprašomos jų savybės ir susidarymas. Pateikiama tyrimo metodika ir įranga, kuri buvo pasirinkta ištirti betono fizikines, mechanines savybes, medžiagų struktūrą, apskaičiuoti poveikį aplinkai.

Trečiajame skyriuje pagrindžiami rekomenduojami stiklo atliekų ir betono šlamo kiekiai. Analizuojamas jų individualus ir kompleksinis poveikis cementinių kompozitų reologijai, mikrostruktūrai, mechaninėms savybėms, ilgaamžiškumui. Nustatytas stiklo atliekų tinkamumas cemento keitimui, o sauso šlamo – smulkiąjam užpildui. Atliktas sukurtu betono poveikio aplinkai vertinimas.

Disertacijos tema publikuoti 5 moksliniai straipsniai: *Web of Science* duomenų bazės *Science Citation Index Expanded* referuojamuose leidiniuose, turinčiuose cituojamumo rodiklį.

Abstract

The dissertation investigates concrete modified with glass processing waste, concrete sludge, and a crystallizing additive. The goal is to develop concrete that is resistant to freeze–thaw cycles and alkali–silica reaction (ASR) by replacing part of the cement with glass waste and sand with concrete sludge. By selecting the optimal amount of technological waste, the aim is to improve the basic properties of concrete while maintaining its resistance to freeze–thaw cycles and alkali–silica reaction.

The tasks addressed in the work include the analysis of glass processing waste and concrete sludge, evaluating their impact on the properties of the cement paste. After determining the recommended waste content, the physical and mechanical properties of the modified concrete are investigated, focusing on resistance to freeze–thaw cycles and alkali–silica reaction. This research sequence aims to substantiate the basic properties and resistance to freeze–thaw cycles and alkali–silica reaction of the newly developed material.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, a list of references, a list of the author’s scientific publications, and a summary in English.

The Introduction discusses the research problem and relevance, describes the object of research, formulates the aim and tasks, and outlines the research methodology, scientific novelty, practical significance, and statements for defence.

The First Chapter discusses active mineral substances, their formation and use in concrete production. It discusses the generation of concrete sludge and glass waste, as well as the impact of their use on the physical and mechanical properties and durability of concrete. The durability of waste-modified concrete and the assessment of carbon dioxide emissions are also described. Conclusions are formulated, and the objectives of the dissertation are refined at the end of the chapter.

The Second Chapter presents the materials used, their properties, and their formation. It describes the research methods and equipment chosen to investigate the structure and properties of the concrete and to calculate its CO₂ emissions.

The Third Chapter substantiates recommended dosages of glass waste and concrete sludge and their effects on cementitious systems. Glass waste was found suitable for cement replacement, and dry sludge for fine aggregate. An environmental impact assessment was also performed.

Five scientific articles were published on the dissertation topic in the *Web of Science* database, *Science Citation Index Expanded*, peer-reviewed publications with a citation index.

Žymėjimai

Santrumpos

AAV_{NR} – stambiojo užpildo kategorija pagal didžiausias atsparumo paviršiaus dilinimuisi vertes (angl. *category of coarse aggregate according to the maximum values of resistance to surface abrasion, Abrasion Value*);

A_NNR – stambiojo užpildo kategorija pagal didžiausias atsparumo dėvėjimuisi dėl dygliuotų padangų poveikio vertes (angl. *category of coarse aggregate according to the maximum values of resistance to wear by studded tyres, Nordic Abrasion*);

ASR – šarmų ir silicio dioksido reakcija (angl. *alkali-silica reaction*);

BS – betonas su stiklo apdirbimo atliekomis (angl. *concrete with glass processing waste*);

CB – cemento akmuo su sausu betono šlamu (angl. *cement paste with dry concrete sludge*);

CBS – cemento akmuo su skystu betono šlamu (angl. *cement paste with liquid concrete sludge*);

CS – cemento akmuo su stiklo apdirbimo atliekos (angl. *cement paste with glass processing waste*);

CSK – cemento akmuo su stiklo apdirbimo atliekos ir kristalizuojančiu priedu (angl. *cement paste with glass processing waste and crystallising admixture*);

F1 – stambaus užpildo atsparumo šaldymui ir atšildymui kategorija (angl. *category of coarse aggregate resistance to freezing and thawing*);

f₃ ir f_{1,5} – smulkiojo ir stambiojo užpildų kategorijos pagal didžiausią smulkiųjų kiekį užpilduose (angl. *categories of fine and coarse aggregates according to the maximum fines content*);

Fl₁₅ – stambiojo užpildo kategorija pagal plokštumo rodiklio didžiausiąsias vertes (angl. *category of coarse aggregate according to the maximum flakiness index*);

G_{F85} ir G_{C90/15} – smulkiojo ir stambiojo užpildų kategorijos pagal stambumą (angl. *categories of fine and coarse aggregates according to grading*);

G_{T17,5} – stambiojo užpildo kategorija pagal stambiojo užpildo išbirų per vidurinį sieta absoliučiąsias ribas ir leidžiamąsias nuokrypas (angl. *category of coarse aggregate according to the absolute limits and tolerances of passing through the mid-size sieve*);

LA₂₀ – stambiojo užpildo kategorija pagal Los Andželo rodiklio didžiausiąsias vertes (angl. *category of coarse aggregate according to the maximum Los Angeles coefficient values*);

M_{DE15} – stambiojo užpildo kategorija pagal atsparumo dėvėjimuisi didžiausiąsias vertes (angl. *category of coarse aggregate according to the maximum resistance to wear, micro-Deval coefficient*);

MS₁₈ – stambiojo užpildo kategorija pagal didžiausiąjį atsparumą magnio sulfato poveikiui (angl. *category of coarse aggregate according to the maximum resistance to magnesium sulfate*);

PSVNR – stambiojo užpildo kategorija pagal atsparumo gludinimui mažiausiąsias vertes (angl. *category of coarse aggregate according to the minimum polished stone value*);

SI₁₅ – stambiojo užpildo kategorija pagal formos rodiklio didžiausiąsias vertes (angl. *category of coarse aggregate according to the maximum shape index*);

SZ₂₆ – stambiojo užpildo kategorija pagal smūginio trupio didžiausiąsias vertes (angl. *category of coarse aggregate according to the maximum impact value*);

UIG – ultragarso impulso sklaidimo greitis, m/s (angl. *ultrasonic pulse velocity*);

V/C – vandens ir cemento santykis (angl. *water–cement ratio*);

V/R – vandens ir rišamosios medžiagos santykis (angl. *water–binder ratio*);

W – kapiliarinis įgėris, % (angl. *capillary water absorption*).

Terminai ir apibrėžimai

ASR (angl. *alkali–silica reaction*) – cheminė reakcija tarp cementiniuose kompozituose esančių šarmų (Na⁺, K⁺) ir smulkaus ar stambaus užpildo silicio dioksido.

Betono šlammas (angl. *concrete sludge*) – betono pramonės atliekos, gaunamos plaunant technologinę įrangą, betono mišinių transportavimo priemonės su likutiniu betono mišiniu, pašalinant daleles, kurios yra didesnės nei 4 mm ir kurių tankis yra ~1220 kg/m³.

GWP (Gobalinio šiltėjimo potencialas) (angl. *global warming potential*) – tai rodiklis, apibūdinantis šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) sukeliama klimato šiltėjimo potencialo vertę, palyginti su anglies dioksido (CO₂) ekvivalentu. Jis apskaičiuojamas pagal vieno kilogramo dujų sukeliama šiltėjimo potencialą, palyginti su vienu kilogramu CO₂.

Kristalizuojantis priedas (angl. *crystallising admixture*) – technologinė įmaiša skirta mažinti vandens įgeriamumą ir didinti atsparumą cheminiam poveikiui.

Sausas betono šlammas (angl. *dry concrete sludge*) – džiovyklėje išdžiovintas betono šlammas, kurio vidutinis dalelių dydis yra 15,85 µm.

PCM (angl. *supplementary cementitious materials*) – medžiagos, kurios yra hidrauliškai aktyvios ir reaguoja su kalcio hidroksidu hidratacijos metu suformuodamos papildomus junginius.

Stiklo apdirbimo atliekos (angl. *glass processing waste*) – stiklo gamybos atliekos, gaunama apdirbant stiklo gaminius su specialiąja technologine įranga; naudojant koaguliantus yra atskiriamos kietos dalelės jas nusodinant iš techninio vandens, kurių vidutinis dalelių dydis yra 4 µm.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamasis teiginys	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
1. BETONO ŠLAMO IR STIKLO APDIRBIMO ATLIEKOS POVEIKIO BETONO SAVYBĖMS APŽVALGA.....	7
1.1. Aktyvių technologinių atliekų susidarymas ir jų panaudojimo betono gamyboje	7
1.2. Stiklo apdirbimo atliekos susidarymas ir jos charakteristikos	9
1.3. Betono šlamo susidarymas ir panaudojimo galimybės betono gamyboje	12
1.4. Kristalizuojantis priedas ir jos poveikis betono savybėms	15
1.5. Technologinių atliekų poveikis betono ilgaamžiškumui	17
1.6. Betono anglies dioksido emisijos vertinimas naudojant papildomas cementines medžiagas	19

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	23
2. NAUDOTOS ŽALIAVOS IR TYRIMO METODAI.....	25
2.1. Naudotos medžiagos.....	25
2.1.1 Cemento charakteristikos	25
2.1.2 Smulkaus užpildo charakteristikos	26
2.1.3 Stambaus užpildo charakteristikos	27
2.1.4 Betono šlamo charakteristikos.....	28
2.1.5 Stiklo apdirbimo atliekos charakteristikos.....	32
2.1.6 Kristalizuojančio priedo charakteristikos	35
2.1.7 Technologiniai priedai ir vanduo.....	36
2.2. Mišinių sudėtys ir bandinių formavimas	37
2.2.1 Bandymuose naudotos mišinių sudėtys	37
2.2.2 Cemento tešlos ir betono mišinių maišymas.....	40
2.2.3 Cemento tešlos ir betono mišinių bandinių formavimas.....	40
2.3. Tyrimų metodikos	40
2.3.1 Naudotų medžiagų savybių nustatymo metodai	41
2.3.2. Cemento tešlos ir betono mišinių bandymų metodai	42
2.3.3 Sukietėjusio betono savybių tyrimų metodai.....	43
2.3.4 Anglies dioksido emisijos vertinimo metodika	46
2.4. Antrojo skyriaus išvados	47
3. BETONO, MODIFIKUOTO STIKLO APDIRBIMO ATLIEKOMIS IR BETONO ŠLAMU SU KRISTALIZUOJANČIU PRIEDU, SAVYBIŲ TYRIMAI	49
3.1. Betono šlamo poveikis cemento akmens savybėms	50
3.2. Stiklo apdirbimo atliekos poveikis cemento tešlos ir cemento akmens savybėms	56
3.3. Kristalizuojančio priedo poveikis betono savybėms	59
3.4. Stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo poveikis tvaraus betono savybėms..	62
3.4.1. Stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo poveikis betono mišinio savybėms	62
3.4.2. Stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo poveikis sukietėjusio betono savybėms	64
3.5. Stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo poveikis tvaraus betono ilgaamžiškumui.....	68
3.6. Tvaraus betono poveikio aplinkai vertinimas	77
3.7. Trečiojo skyriaus išvados	79
BENDROSIOS IŠVADOS	83
REKOMENDACIJOS	85
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	87
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	105
SUMMARY IN ENGLISH.....	107

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the dissertation.....	2
Research object	2
Aim of the dissertation	2
Tasks of the dissertation	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the dissertation	3
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	4
Structure of the dissertation.....	5
1. CONCRETE SLUDGE AND GLASS PROCESSING WASTES EFFECT ON CONCRETE PROPERTIES	7
1.1. Generation of active technological waste and its use in concrete production	7
1.2. Generation and characteristics of glass processing waste	9
1.3. Formation of concrete sludge and its uses in concrete production	12
1.4. Crystallising additive and its effect on concrete properties	15
1.5. Impact of technological waste on the durability of concrete	17
1.6. Assessment of carbon dioxide emissions from concrete using additional cementitious materials	20
1.7. Conclusion of the First Chapter and formulation of the dissertation tasks	23

2. MATERIALS USED AND RESEARCH METHODS	25
2.1. Materials used for research.....	25
2.1.1. Cement characteristics	25
2.1.2. Characteristics of fine aggregate.....	26
2.1.3. Characteristics of coarse aggregate.....	27
2.1.4. Characteristics of concrete sludge	28
2.1.5. Characteristics of glass processing waste	32
2.1.6. Crystallising additive characteristics	35
2.1.7. Technological additives and water.....	36
2.2. Mixture compositions and sample formation	37
2.2.1. Compositions used in the tests.....	37
2.2.2. Mixing procedures of cement paste and concrete mixtures	40
2.2.3. Formation of cement paste and concrete specimens	40
2.3. Research methods.....	40
2.3.1. Methods of research of the materials used.....	41
2.3.2. Cement paste and concrete mix testing methods	42
2.3.3. Concrete testing methods.....	43
2.3.4. Carbon dioxide emission assessment methodology	46
2.4. Conclusions of the Second Chapter.....	47
3. RESEARCH ON THE PROPERTIES OF CONCRETE MODIFIED WITH GLASS PROCESSING WASTE AND CONCRETE SLUDGE WITH CRYSTALLISING ADDITIVE.....	49
3.1. Concrete sludge effect on cement stone properties	50
3.2. Glass processing waste effect on cement paste and cement stone properties	56
3.3. Effect of crystallising additive on concrete properties	59
3.4. Influence of glass processing waste and concrete sludge on the properties of sustainable concrete.....	62
3.4.1. Effect of glass processing waste and concrete sludge on the properties of concrete mix.....	62
3.4.2. Effect of glass processing waste and concrete slag on the properties of hardened concrete	64
3.5. Influence of glass processing waste and concrete sludge on the durability of sustainable concrete.....	68
3.6. Environmental impact assessment of sustainable concrete	77
3.7. Conclusions of the Third Chapter.....	79
GENERAL CONCLUSIONS	83
RECOMMENDATIONS	85
REFERENCES	87
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	105
SUMMARY IN ENGLISH.....	107

Įvadas

Problemos formulavimas

Lietuvoje intensyviai vystomos gyvenamųjų namų ir infrastruktūros statybos. Didėjant gamybos apimtims atsiranda ir daugiau atliekų, kurios susidaro medžiagų gamybos ar statybų procesų metu. Viena tokių atliekų rūšių susidaro grįžtant pertekliniam betonui iš statybos objektų arba tiesiog plaunant autobetonmaišes po darbo dienos. Apskaičiuota, kad vidutiniškai per darbo dieną devynkubės autobetonmaišės grąžina į betono ruošimo gamyklas apie 200–400 kg atliekų. Dalis šių atliekų gaminant betoną nepanaudojamos ir sunkiai utilizuojamos. Šios atliekos – tai betono šlamas, kuris kaupiasi sąvartynuose, ir užterštas vanduo, kuris turi būti papildomai apdorojamas ir valomas. Kita betono gamybai tinkamos atliekos susidaro stiklo pramonėje. Stiklo apdirbimo atliekos susidaro stiklo lakštų apdirbimo procese. Šiose atliekose yra daug silicio dioksido, todėl jos gali būti pucolaniškai aktyvios ir skatinti cemento hidrataciją. Stiklo apdirbimo atliekos iki šiol nėra naudojamos ir nugula sąvartynuose. Dėl šių priežasčių tiek Lietuvai, tiek ir Pasauliui aktuali problema – betono šlamo ir stiklo apdirbimo atliekų sunaudojimas, paverčiant jas naudingais komponentais betono sudėtyje ir taip mažinant šių atliekų kaupimąsi sąvartynuose.

Siekiant taupyti neatsinaujinančius gamtos išteklius, t.y. naudojamo cemento ir užpildų kiekius gaminamame betone, ir kuriant betoną iš komponentų, darančių

mažiau poveikio aplinkai, būtina ištirti abiejų atliekų ir kristalizuojančio priedo poveikį betono savybėms. Šiuo metu Lietuvoje betono šlamas ir stiklo apdirbimo atliekos, nepaisant jų potencialo, betono gamyboje dar nenaudojamos. Tačiau, siekiant patenkinti statybų sektoriaus poreikį naujoms, žiedinės ekonomikos principus atitinkančioms medžiagoms, tikslinga ištirti, kaip šios atliekos veikia betono struktūrą, savybes ir ilgaamžiškumą.

Darbo aktualumas

Naudojant stiklo apdirbimo atlieką ir betono šlamą, kartu mažinama į aplinką išskiriamą CO₂ emisija ir didinamas betono ilgaikiškumas. Stiklo apdirbimo atliekų naudojimas gali sumažinti cemento kiekį betono gamyboje, o betono šlamo naudojimas – smulkaus užpildo ir geriamojo vandens poreikį. Abiejų atliekų panaudojimas gali reikšmingai sumažinti į aplinką išsiskyrusio CO₂ kiekį. Dėl mažinamo cemento kiekio mažėja žalingas cemento gamybos poveikis aplinkai, o mažinant natūralių iškastinių užpildų naudojimą taupomi gamtiniai resursai ir mažinamas neigiamas poveikis gamtai. Įgyvendinant Europos žaliojo kurso ir kitus tarptautinius susitarimus, numatoma mažinti išskiriamą CO₂ kiekį visoje pramonėje, įskaitant ir statybos sektorių.

Tyrimų objektas

Atsparus šalčiui ir šarminei korozijai betonas, kuriame dalis cemento pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, o dalis smėlio ir vandens – betono šlamu, papildomai naudojant kristalizuojantį priedą.

Darbo tikslas

Sukurti ir ištirti šalčiui bei šarminei korozijai atsparų betoną, kurio sudėtyje iki 20 % cemento pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, o 5 % smėlio – sausu betono šlamu, papildomai naudojant kristalizuojantį priedą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Ištirti betono šlamo ir stiklo apdirbimo atliekos cheminę bei minerologinę sudėtis, dalelių tankį, piltinį tankį, pucolaninį aktyvumą, savitąjį paviršių.
2. Nustatyti betono šlamo ir stiklo apdirbimo atliekos įtaką cemento tešlos reologinėms ir cemento akmens mechaninėms savybėms, mikrostruktūrai.
3. Nustatyti betono šlamo, stiklo apdirbimo atliekos ir kristalizuojančio priedo poveikį sukietėjusio betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms, atsparumui šalčiui ir šarminei korozijai.
4. Parinkti tinkamus betono šlamo, kaip smėlio pakaitalo, ir stiklo apdirbimo atliekų, kaip cemento pakaitalo, kiekius, kuriant šalčiui ir šarminei korozijai atsparų betoną.
5. Įvertinti sukurto šalčiui ir šarminei korozijai atsparaus betono poveikį aplinkai, taikant gyvavimo ciklo analizę.

Tyrimų metodika

Stiklo apdirbimo atliekų, betono šlamo, kristalizuojančio priedo ir cemento akmens struktūros tyrimams taikyti skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM), rentgenostruktūrinės ir terminės analizės metodai. Cemento akmens ir betono savybių tyrimams taikyti standartizuoti tyrimų metodai, skirti tankiui, lenkiamajam stipriui, gniuždomajam stipriui, įgėriui, atsparumui šalčiui nustatyti, o šarminės korozijos tyrimai buvo atliekami pagal RILEM AAR-4 tyrimų metodiką. Betono poveikis aplinkai vertintas taikant gyvavimo ciklo analizę, apimančią etapus nuo žaliavų gavybos iki gamybos proceso pabaigos.

Darbo mokslinis naujumas

Sukurtas betonas, kurio sudėtyje dalis cemento pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, o dalis smėlio – betono šlamu. Parinktas rekomenduojamas stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo naudojamas santykis betono mišiniuose. Dėl stiklo apdirbimo atliekų sąveikos su betono šlamu sutankėja mišinių struktūra, paspartėja hidratacijos procesas ir padidėja hidratacijos produktų išeiga. Kristalizuojantis priedas modifikuoja betono porų struktūrą, taip padidindamas jo atsparumą šalčiui (atlaikomų ciklų skaičių). Šis kompleksinis poveikis leidžia sumažinti naudojamo cemento kiekį 20 %, smulkaus užpildo – 5 %, nebloginant betono mechaninių savybių, atsparumo šalčiui ir šarminei korozijai. Kristalizuojantis priedas modifi-

kuotame betono mišinyje neutralizuoja neigiamą stiklo apdirbimo atliekų bei betono šlamo poveikį reologinėms savybėms ir modifikuoja porų struktūrą bei traukumą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimų rezultatai gali būti naudojami gaminant Lietuvos klimatinėms sąlygoms atsparų betoną su mažesne CO₂ emisija. Kompleksinis stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo naudojimas betono gamyboje leidžia sumažinti CO₂ emisiją ir padidinti svarbiausias betono charakteristikas – atsparumą šalčiui ir šarminei korozijai. Šie veiksniai sudaro galimybę betonui naudoti didelį kiekį stiklo apdirbimo atliekų ir utilizuoti susidarantį betono šlamą gamyklose.

Ginamasis teiginys

Stiklo apdirbimo atliekos kartu su kristalizuojančiu priedu dalyvauja cemento hidratacijos procese ir keičia betono porų struktūrą. Dėl susidarančių papildomų hidratacijos produktų formuojasi tankesnė mikrostruktūra, intensyvėja hidratacijos procesas, betono traukumas sumažėja apie 15 %, o atsparumas šalčiui ir šarminei korozijai padidėja.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti aštuoni moksliniai straipsniai: 5 – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* (Pocius & Nagrockienė, 2023; Pocius et al., 2021, 2023, 2024, 2025); vienas – į tarptautines duomenų bazes įtrauktuose leidinyje (Pocius & Čepulis, 2023); vienas – konferencijos straipsnių rinkinyje, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazės „Conference Proceedings“ leidinius (Pocius et al., 2023); vienas – konferencijos straipsnių rinkinyje (Pocius & Nagrockienė, 2022).

Disertacijoje pristatytų tyrimų rezultatai paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- 25-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, pranešimo tema: „Sauso betono šlamo įtaka cemento akmens ilgaamžiškumui“, 2022 m., Vilniuje, Lietuvoje;
- ICMETS 2022: 5-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Modern Research in Engineering, Technology & Science“, 2022 m., Roterdame, Nyderlanduose;

- IMST 2022: 5-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Innovative Materials, Structure and Technologies“, 2022 m., Rygoje, Latvijoje;
- 26-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2023 m., Vilniuje, Lietuvoje;
- NTCC 2023: 7-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Non-Traditional Cement & Concrete“, 2023 m., Brno, Čekijoje;
- MBMST 2023: 14-oje tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“, 2023 m., Vilniuje, Lietuvoje;
- 27-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2024 m., Vilniuje, Lietuvoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir šaltinių bei autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba.

Darbo apimtis yra 137 puslapiai, tekste pateikta 11 numeruotų formulių, 45 paveikslai ir 17 lentelių. Rašant disertaciją panaudoti 193 literatūros šaltiniai.

Betono šlamo ir stiklo apdirbimo atliekos poveikio betono savybėms apžvalga

Šiame skyriuje išanalizuotos stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo susidarymo sąlygos bei savybės, aptariamas jų poveikis betono technologinėms savybėms, taip pat nagrinėjamas šių medžiagų ir kristalizuojančio priedo poveikis betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms. Skyriaus tematika kartu su bendraautoriais paskelbti 5 straipsniai (Pocius et al., 2021, 2023a, 2023b, 2024, 2025), tyrimų rezultatai pristatyti 7 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

1.1. Aktyvių technologinių atliekų susidarymas ir panaudojimas betono gamyboje

Pramonės sritys, kuriose sunaudojami dideli energijos kiekiai, traukia didelį visuomenės dėmesį. Viena jų – cemento gamyba. Šios pramonės tvarumas tampa vis aktualesnis ne tik dėl ekologinių priežasčių, bet ir dėl augančių kainų, kurios

didina daugelio statybos produktų kainas. Nustatyta, kad gaminant cementą išskiriami dideli CO₂ kiekiai ir kitų šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Vienai tonai Portlando cemento pagaminti į atmosferą išmetama apie 0,9 tonos CO₂.

Išskiriami du pagrindiniai metodai, kuriais siekiama sumažinti neigiamą cemento poveikį aplinkai. Vienas jų – cemento kiekio mažinimas įvairiuose kompozituose, dalį jo keičiant antrinėmis žaliavomis – pucolaninio aktyvumo medžiagomis (Bueno et al., 2020; Rattanachu et al., 2020). Kitas būdas – atliekų panaudojimas cemento gamyboje, išgaunant sudėtinius cementus. Mokslininkai tyrė tokias atliekas kaip aukštakrosnių šlakas, lakieji pelenai, stiklo atliekos, cemento krosnių dulkės, ryžių lukštų pelenai, metakaolinas bei silicio mikrodulkės. Nustatyta, kad šios medžiagos teigiamai veikia cemento savybes, gerina sukietėjusio cemento akmens ilgaamžiškumą bei atsparumą agresyvioms aplinkos sąlygoms (Sakai et al., 2005; Uchikawa et al., 1997; Vegas et al., 2015; Monteagudo et al., 2014; Ayub et al., 2014). Taip pat literatūroje gausu informacijos apie maišytus trijų komponentų cementus: nustatyta, kad parinkus tinkamas papildomų cementinių medžiagų proporcijas, galima padidinti cemento tešlos mechaninį stiprį (Ghrici et al., 2007).

Ilgą laiką populiariausiomis pucolaninio aktyvumo atliekomis cementiniuose kompozituose buvo lakieji pelenai (Rathnayake et al., 2018), kurie pagerina medžiagos mechanines savybes bei ilgaamžiškumą (Argiz et al., 2018). Dėl šio teigiamo poveikio rinka tapo priklausoma nuo lakiųjų pelenų, tačiau energetikos perėjimas prie atsinaujinančių šaltinių (Diaz-Loya et al., 2019) sumažino jų susidarymo kiekius (Gray, 2019). Sumažėjusi pasiūla lėmė kainų kilimą, todėl lakiųjų pelenų naudojimas tapo ekonomiškai neefektyvus. Tai paskatino mokslininkus ieškoti alternatyvių pucolaninių medžiagų (Paris et al., 2016).

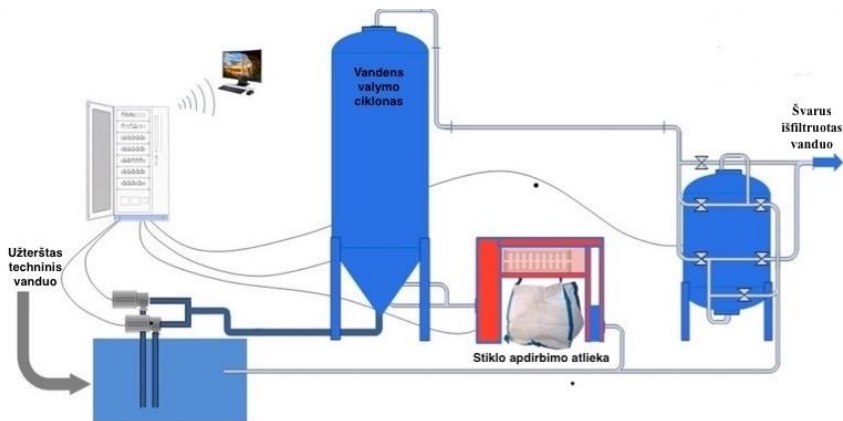
Pucolaninės atliekos, naudojamos kaip cemento pakaitalas, turi atitikti tam tikrus reikalavimus. Pirmiausia, jos privalo pasižymėti tinkama chemine sudėtimi, būti reaktyvios ir suformuoti tankią struktūrą. Antra, žaliava turi būti lengvai priinama visame pasaulyje, kad būtų minimizuoti transportavimo kaštai bei bendra produkto kaina.

Šiuo metu didelio dėmesio sulaukia stiklo atliekos, kurių kiekiai nuolat auga kartu su stiklo gaminių poreikiu. Stiklas plačiai naudojamas langų, pakuočių gamyboje bei kitose pramonės šakose dėl savo ilgaamžiškumo ir skaidrumo (Musikant, 2003). Neperdirbtas stiklas kelia grėsmę aplinkai, nes tai inertiška medžiaga, kuri biologiškai neyra ir deginama nesudega, todėl kaupiasi sąvartnyuose (Krainovic et al., 2024; Hamada et al., 2022). 2018 m. duomenimis, Europos Sąjungoje susidarė apie 16,5 mln. tonų stiklo atliekų, iš kurių 12 mln. tonų buvo perdirbta (Sabbrojjaman et al., 2024).

1.2. Stiklo apdirbimo atliekų susidarymas ir jos charakteristikos

Gaminant ir apdirbant stiklą susidaro gausūs atliekų kiekiai, todėl mokslininkai nuolat ieško efektyvių jų panaudojimo būdų. Nors ši žaliava žinoma seniai, dėl siekio mažinti CO₂ emisijas, atliekų kaupimąsi sąvartynuose bei įgyvendinti žiedinės ekonomikos principus, stiklo atliekų tyrimai vėl tapo itin aktualūs. Jos pritraukė dėmesį dėl didelio silicio kiekio ir stiklo trapumo, kuris leidžia lengvai apdirbti šią medžiagą (Shi et al., 2007).

Nagrinėjamos stiklo apdirbimo atliekos yra išskirtinė, nes ji susidaro valant techninį vandenį cheminiais reagentais specialioje įrangoje (principlinė įrangos schema pateikta 1.1 pav.). Gamybos proceso metu užterštas techninis vanduo patenka į ciklonus, kuriuose naudojami specialūs valymo priedai, padedantys nusodinti kietąsias daleles. Atskyrus vandenį nuo skendinčiųjų dalelių, jis grąžinamas į gamybos procesą, o nusodintos stiklo dalelės papildomai sausinamos filtro presais. Galiausiai nusausintos stiklo apdirbimo atliekos iškraunamos į konteinerius, kuriuose yra sandėliuojamos.



1.1 pav Vandens, užteršto stiklo dalelėmis, valymo sistemos principlinė schema
Fig. 1.1. Schematics of a system for cleaning water contaminated with glass particles

2015 m. duomenimis, JAV sąvartynuose susikauptė maždaug 10,4 mln. tonų stiklo atliekų. Nustatyta, kad 60 % stiklo atliekų lieka sąvartynuose, 26 % perdirbama, o likę 14 % šalinami deginimo įrenginiuose (U.S. Environmental Protection Agency, 2018). Neperdirbtas stiklas reprezentuoja neišnaudotą medžiagų potencialą, todėl jo antrinį panaudojimą būtina didinti.

Viena iš stiklo pramonėje susidarančių atliekų rūšių – smulkūs milteliai arba malto stiklo dalelės, kurių dydis nesiekia 45 μm . Malto stiklas tyrimams pasirinktas dėl lengvo prieinamumo ir potencialaus reaktyvumo su portlandcementu, kurį lemia didelis silicio kiekis (Rashidian-Dezfouli et al., 2018). Be to, nustatyta, kad naudojant malto stiklą betono mišiniuose galima sumažinti CO₂ emisijas: kiekvienam kilogramui sunaudoto stiklo šių dujų išsiskyrimas sumažėja puse kilogramo (Tucker et al., 2018).

Stiklo atliekos naudingos statybinių medžiagų gamybai dėl didelės silicio dioksido koncentracijos (Pintori et al., 2022) ir pucolaninio aktyvumo. Šios savybės leidžia daryti prielaidą, kad stiklo atliekų integracija į betono gamybą sumažintų sąvartynų apkrovą, CO₂ emisiją ir natūralių žaliavų poreikį. Tinkamas šių atliekų naudojimas gali sumažinti vandens ir grunto taršą bei neigiamą poveikį žmonių sveikatai (Abubakar et al., 2022). Stiklo atliekų taikymo betono gamyboje pradžia siejama su 1960 m. (Meyer et al., 1999). Įvairūs mokslininkai (Ahmad et al., 2022; Oaidi et al., 2022; Ferdous et al., 2021; Gowtham et al., 2021) stiklą bandė naudoti kaip smulkųjį ar stambųjį užpildą, o miltelių pavidalo atliekas – kaip cemento pakaitalą.

Nustatyta, kad malto stiklas gali turėti nedidelę neigiamą įtaką sukietėjusiems cementiniams kompozitams – stebimi mažesni gniuždomieji ir lenkiamieji stipriai (Shayan et al., 2006; Taha et al., 2008). Visgi, kiti tyrėjai pastebėjo, kad itin smulkiai sumaltas stiklas pasižymi ryškiomis pucolaninėmis savybėmis ir veikia panašiai kaip silicio dulkės (Shi et al., 2007; Lee et al., 2011). Nepaisant teigiamų savybių, malto stiklo kiekis turi būti ribojamas. Vienas pagrindinių trūkumų – šarmų ir silicio dioksido reakcijos (ASR) sukeliama korozija (Park et al., 2004; Dyer et al., 2001; Chen et al., 2006; Schafer et al., 2019; Shi et al., 2005; Matos et al., 2012; Shayan et al., 2004; Serpa et al., 2013). Malto stiklo panaudojimo galimybes intensyviai tiria daugybė mokslininkų (Afshinnia et al., 2015; Jin et al., 2000; Metwally, 2007; Aliabdo et al., 2016; Zidol et al., 2017).

Dalis mokslininkų tyrinėja stambesnės frakcijos stiklo atliekas ir taiko jas kaip užpildus statybinėse kompozicijose. Pavyzdžiui, stiklo atliekos taikytos kaip mikroužpildas gaminant asfaltbetonį. Nustatyta, kad naudojant iki 18 % šio priedo didėja mišinio stabilumas, nors vertės išlieka mažesnės, palyginti su asfaltbetoniu be stiklo priedų. Didinant stiklo atliekų kiekį, auga asfaltbetonio atsparumas nuovargiui ir takumas (Ogundipe et al., 2020). Naudojant stiklą kaip smulkųjį užpildą cementiniuose kompozituose, tyrėjai fiksavo mechaninio stiprio mažėjimą, tačiau toks užpildas pagerina betono apdirbamumą, ilgaamžiškumą, atsparumą sulfatams bei tūrinį pastovumą (Doo-Yeol et al., 2022). Stiklo atliekas bandyta naudoti ir kaip stambiuosius užpildus: pakeitus iki 17,5 % natūralaus stambaus užpildo stiklo atliekomis ir šlakais, nustatyta tik nežymi įtaka betono mechaninėms savybėms (Xin et al., 2016). Kiti tyrėjai, keisdami stambųjį bazalto užpildą stiklo at-

liekomis, nustatė, kad iki 25 % natūralios žaliavos galima pakeisti šiomis atliekomis – iki šios ribos bandinių stipris didėja, o ją viršijus mechaninės savybės pradeda blogėti (Ibrahim, 2020).

Dar viena, kol kas mažai ištirta medžiaga – stiklo apdirbimo atliekos. Pietų Korėjos mokslininkai, analizavę stiklo apdirbimo atliekos įtaką betono ilgaamžiškumui, nustatė, kad šios atliekos padidina atsparumą šalčiui (tiek gryno vandens, tiek ledą tirpančių druskų aplinkoje), chloridams ir paviršiaus atsiloksniavimui (Jihwan et al., 2014). Kiti tyrėjai nustatė, kad stiklo apdirbimo atliekos, naudojamos kaip cemento pakaitalas, gerina bandinių mechanines savybes, mikrostruktūrą, mažina poringumą ir didina atsparumą šalčiui (Hyeonggi et al., 2018). Cementinių skiedinių tyrimai taip pat patvirtino, kad stiklo apdirbimo atliekos gerina mechanines savybes po 28 kietėjimo parų ir gali efektyviai slopinti ASR plėtimąsi (Jihwan et al., 2015). Be to, stiklo apdirbimo atliekos pritaikytos keraminėms plytomis gaminti: naudojant iki 25 % šios atliekos, gniuždomasis stipris padidėjo 37 %, o poringumas ir vandens įgeris – sumažėjo (Syed et al., 2018).

Pagrindinės mokslininkų tirtos savybės buvo betono mišinių konsistencija, tankis, gniuždomasis ir lenkiamasis stipris, vandens įmirkis. Šviežio betono mišinių savybių tyrimų rezultatai yra nevienodi: dalis autorių teigia, kad stiklo atliekos pagerina apdirbamumą dėl lygaus dalelių paviršiaus ir mažesnio vandens įmirkio (Baikerikar et al., 2023; Wright et al., 2013), tačiau kiti fiksavo priešingą tendenciją (Afshinnia et al., 2016; Limbachiya, 2009). Manoma, kad blogesnes konsistencijos savybes lemia netaisyklinga dalelių geometrija ir šurkščių tekstūrą. Taip pat pastebėta (Taha et al., 2009), kad dėl lygaus paviršiaus sumažėjusi trintis tarp stiklo dalelių ir cemento teslos gali padidinti segregacijos bei vandens atsiskyrimo riziką.

Atlikus bandymus su savaimė susitankinančiu betonu, nustatyta, kad naudojant stiklo atliekas galima pasiekti panašias takumo savybes kaip ir įprastuose mišiniuose bei sumažinti superplastiklių poreikį. Tai aiškinama sumažėjusia trintimi tarp stiklo dalelių ir cemento teslos (Ali et al., 2012; Kou et al., 2009).

Tyrinėdami betono tankį, mokslininkai dažniausiai pastebi, kad stiklo priedai mažina tiek šviežio mišinio, tiek sukietėjusio betono tankį (de Castro et al., 2013; Lee et al., 2013). Tokius rezultatus lemia mažesnis stiklo dalelių savitasis tankis, palyginti su gamtiniais užpildais (Hamada et al., 2022). Visgi, kai kurie tyrėjai (Adaway et al., 2015) fiksavo tankio padidėjimą smulkųjų užpildą pakeitus 15 % stiklo atliekų, tačiau toliau didinant priedo kiekį tankis pradėjo mažėti.

Naudojant miltelių pavidalo stiklo atliekas, pastebėta, kad labai smulkios sferinės dalelės pagerina betono porų struktūrą. Tai leidžia sumažinti vandens įgerį bei padidinti atsparumą įvairioms korozijos formoms, pavyzdžiui, sulfatų ar šarmų sukeliama suiriumi (Abed et al., 2024). Taip pat stiklo milteliai gali optimizuoti porų tarpusavio ryšius ir pagerinti vandens judėjimą vidinėje betono

struktūroje (Sathipan et al., 2024). Naudojant stiklo atliekas vietoj cemento, pradžioje jos gali sumažinti poringumą dėl geresnio mišinio sutankėjimo bei apriboti stambių porų formavimąsi (Li et al., 2021). Nustatyta tiesioginė priklausomybė: didėjant stiklo miltelių kiekiui, vandens įgeris mažėja (Yavuz et al., 2024). Porų struktūrai bei mišinio tankumui reikšmingos įtakos turi ir vandens bei rišamosios medžiagos santykis (V/R) (de Moura et al., 2021).

Analizuojant lenkiamąjį stiprį, gauti prieštaringi rezultatai. Dalis mokslininkų (Batayneh et al., 2007; Ismail et al., 2009), smulkiuosius užpildus keisdami stiklo atliekomis, fiksavo teigiamą poveikį lenkiamajam stipriui. Nors kai kurie autoriai (Tan et al., 2013; Park et al., 2004) nustatė priešingą tendenciją, tie patys tyrėjai (Tan et al., 2013) pastebėjo padidėjusį tempiamąjį stiprį skeliant.

Įprastai dalį užpildų pakeitus stiklo atliekomis, gniuždomasis stipris mažėja. Tai aiškinama mažesniu pačių stiklo dalelių stipriu, lygiu, kampuotu jų paviršiumi ir silpnesniu sukibimu vidinėje struktūroje (Tan et al., 2013; Choi et al., 2017; Hamada et al., 2022). Tačiau nustatyta (Shao et al., 2000), kad mažesnės nei 38 μm dalelės gali dalyvauti pucolaninėse reakcijose. Dėl šių cheminių reakcijų ir papildomai susidarančių produktų gali būti stebimas gniuždomojo stiprio augimas (Pascual et al., 2021; Jubeh et al., 2019).

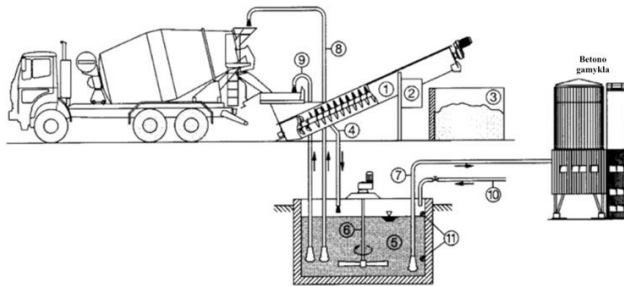
Smulkios stiklo dalelės (pakeitus iki 21 % smulkiojo užpildo) pagerino betono mikrostruktūrą (Nagrockiene et al., 2021). Cementą pakeitus stiklo milteliais, taip pat sumažėjo chloridų jonų skverbtis, nes papildoma hidratacija padidina C-S-H gelio kiekį (Jesus et al., 2019). Dar viena priežastis, ribojanti chloridų skvarbą – neporinga stiklo dalelių prigimtis.

1.3. Betono šlamo susidarymas ir panaudojimo galimybės betono gamyboje

Nepaisant portlandcemento gamybos daromos žalos aplinkai, didėjant produkcijos mastams, kartu auga ir susidarančių atliekų kiekiai. Viena tokių atliekų – betono šlamos. Po darbo dienos kiekviena 9m³ talpos autobetonmaišė į gamyklą grąžina nuo 200 iki 400 kg nesukietėjusio betono likučių (Borger et al., 1994; Correia et al., 2009).

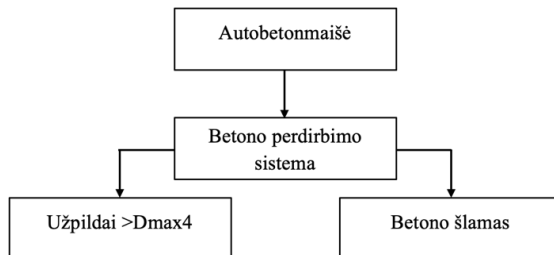
Apskaičiuota, kad nuo 1 % iki 4 % viso betono mišinio virsta šlamu (Tam et al., 2007). Pagrindinė betono šlamos susidarymo priežastis – prie autobetonmaišės būgno sienelių prilipęs mišinys, kuris po darbo dienos yra išplaunamas (Rughooputh et al., 2017). Antroji priežastis, ypač aktuali didmiesčiuose, – į gamyklą grąžinamas betonas, kuris statybvietėse liko neiškrautas dėl per didelio užsakyto kiekio (Serifou et al., 2013). Dėl šių veiksnių gamyklose kaupiasi dideli atliekų kiekiai, kurių utilizavimas brangiai kainuoja (Vieira et al., 2016), todėl gamintojai priversti ieškoti papildomų sprendimų šiai problemai spręsti.

Vienas efektyviausių būdų – likutinio betono perdirbimo sistemos, leidžiančios atskirti cemento daleles nuo užpildų. Nuplauti užpildai vėliau gali būti pakartotinai naudojami gamyboje (Vieira et al., 2016). Siekiant išvalyti plovimo vandenį ir pašalinti smulkiąsias daleles, jis filtruojamas filtrų presu, o susidaręs betono šlamos papildomai džiovinamas džiovyklėje – taip gaunama sausa medžiaga. Jei vanduo nefiltruojamas, susidaro įprastas skystas šlamos. Betono šlamos susidarymo įranga pavaizduota 1.2 pav., o susidarymo schema – 1.3 pav.



1.2 pav. Betono šlamos gavimo įrangos atvaizdavimas: 1 – atskyrimo talpa; 2 – valdymo spinta; 3 – regeneruotų užpildų išbėrimo vieta; 4 – betono šlamos nutekėjimo vamzdis; 5 – betono šlamos talpa; 6 – maišytuvas; 7 – betono šlamos padavimo vamzdis į betono gamybą; 8 – betono šlamos padavimo vamzdis autobetonmaišiams plauti; 9 – betono šlamos padavimo vamzdis priėmimo voniai plauti; 10 – betono šlamos gražinimo vamzdis iš betono gamybos; 11 – maksimalus ir minimalus betono šlamos talpos lygis

Fig. 1.2. Representation of concrete waste equipment; 1 – separation tank; 2 – control panel; 3 – regenerate filler pouring site; 4 – concrete waste drainage pipe; 5 – concrete waste tank; 6 – mixer; 7 – concrete waste feed pipe to concrete production; 8 – concrete waste feed pipe for autobeton mixers washing; 9 – concrete waste feed pipe for tank washing; 10 – concrete waste return pipe from concrete production; 11 – maximum and minimum levels of the concrete waste tank



1.3 pav Betono šlamos susidarymo principinė schema

Fig. 1.3. Schematic diagram of concrete sludge formation

Vanduo yra vienas iš natūralių gamtos išteklių, kurio itin didelius kiekius suvartoja statybos sektorius, o ypač – betono pramonė (Prata et al., 2019). Intensyvus vandens naudojimas lemia didelio kiekio užterštų nuotekų susidarymą. Susidarantis betono šlammas susideda iš ištirpusių cemento dalelių, o jo pH vertė siekia apie 12 (Low et al., 2007). Betono šlamu galima bandyti keisti gamyboje naudojamą vandenį, kartu koreguojant ir smulkiojo užpildo kiekį sudėtyje (Ferriz-Papi, 2014), tačiau itin svarbu atsižvelgti į šlamo tankį. Pastebėta, kad betono šlammas spartina rišimosi laiką, tačiau neigiamai veikia stiprumines savybes (Cebeci et al., 1989). Pagal JAV aplinkos apsaugos agentūros (EPA) rekomendacijas, regeneruotame vandenyje bendras skendinčiųjų dalelių kiekis neturi viršyti 30 mg/l, o betono šlame šis rodiklis dažniausiai yra gerokai didesnis.

Dauguma tyrimų, susijusių su betono atliekomis, analizuoja perdirbtus užpildus, tačiau smulkesnės nei 5 mm dalelės vis dar ištirtos nepakankamai (Shi et al., 2019). Kai kurie mokslininkai bandė naudoti išplautą likutinio betono perdirbimo sistemų smėlį. Pastebėta, kad toks smėlis yra užterštas smulkiomis cemento dalelėmis, o tai veikia jo granulimetrinę sudėtį bei piltinį tankį. Šio smėlio naudojimas betono mišiniuose yra įmanomas, tačiau tam reikalingos didesnės superplastiklių dozės.

Teigiamų rezultatų pasiekta ir naudojant į gamyklą gražintą betono mišinį kaip užpildą (Ferrari et al., 2014). Į dar plastišką mišinį pridendant netoksiškų cheminių priedų, jis paverčiamas granuliuota medžiaga, kuri vėliau gali būti sėkmingai naudojama kaip betono užpildas.

Kiti mokslininkai analizavo betono šlamo panaudojimo galimybes blokų gamybos procese (Xuan et al., 2016). Tyrimų metu mišiniams naudotas sausas betono šlammas bei išplautas smėlis iš likutinio betono perdirbimo sistemų, o gauti cementiniai kompozitai kietinti CO₂ aplinkoje. Nustatyta, kad iš tokio mišinio pagaminti sienų blokai yra tvarūs ir neutralūs CO₂ išmetimo požiūriu: panaudotos atliekos mažina poveikį aplinkai, o kietinimo metu absorbuojamas CO₂ kiekis kompensuoja emisijas.

Betono gamyklose susidarantį šlamą taip pat bandyta naudoti kaip žaliavą cemento gamyboje (Schoon et al., 2015). Tačiau nustatyta, kad toks panaudojimo būdas nėra tinkamas.

Kituose tyrimuose mokslininkai betono šlamą naudojo kaip mikroužpildą skiedinių gamybai (Audo et al., 2016). Paaiškėjo, kad sausas šlammas neigiamai veikia skiedinių apdirbamumą, todėl, siekiant kompensuoti plastiškumo praradimą, būtina naudoti didesnes superplastiklių dozes. Kitas nustatytas trūkumas – dideli gniuždomojo stiprio verčių svyravimai: palyginti su kontroliniais bandiniais, stipris svyravo nuo –30 % iki +17 %.

Tyrėjai betono šlamą taip pat bandė taikyti vietoj cemento kelių pagrindams stabilizuoti (Zhang et al., 2007). Kiti autoriai (Reiterman et al., 2022), tirdami

pagrindų stabilizavimą, gavo teigiamų rezultatų: nustatyta, kad gniuždomojo stiprio kontekste betono šlamos pasiekė 38 % stabilizavimo efektyvumo, palyginti su tokiu pat kiekiu standartinio portlandcemento.

Mokslininkai taip pat detaliau analizavo gautą betono šlamą. Nustatyta, kad jame dominuoja cemento dalelės ir nedidelis kiekis smėlio dalelių. Tirtame šlame nustatyta 49,7 % cemento dalelių, 38,7 % smėlio dalelių ir 11,6 % kalkakmenio užpildo (Audo et al., 2018).

1.4. Kristalizuojantis priedas ir jos poveikis betono savybėms

Betono savybės gali reikšmingai skirtis priklausomai nuo naudojamų cheminių įmaišų. Naudojant priedus, galima sumažinti pirminių žaliavų poreikį bei neigiamą poveikį aplinkai, kartu gerinant betono savybes ir ilgaamžiškumą, kad šis atitiktų šiuolaikinių konstrukcijų reikalavimus. Viena tokių įmaišų – kristalizuojantis priedas, gerinanti sukietėjusio betono charakteristikas. Tačiau modernus betonas dažnai susiduria su traukumo problema ir dėl to atsirandančiais trūkiais. Ši problema ypač aktuali šiandienos statybose, kurioms būdingi dideli tarpatastai, masyvūs tūriai, stiprūs konstrukciniai suvaržymai bei eksploatacija agresyviose aplinkose.

Mokslininkų teigimu, net 80 % įtrūkių konstrukcijose atsiranda būtent dėl susitraukimo procesų (Wang, 2007). Atsiradus trūkių, betono nepralaidumas ir atsparumas cheminiam poveikiui reikšmingai sumažėja (Wang et al., 1997). Per juos į vidų patenkančios korozija sukeliančios medžiagos paspartina betono savybių blogėjimą bei armatūros koroziją (Mehta, 1994), o tai gali gerokai sutrumpinti konstrukcijos tarnavimo laiką. Siekiant padidinti ilgaamžiškumą, būtina ieškoti sprendimų, kaip išvengti susitraukimo įtrūkių. Kristalizuojantys priedai gali būti efektyviai naudojamos tiek betono savybėms gerinti, tiek šių trūkių prevencijai.

Džiūvimo susitraukimas apibūdinamas kaip betono tūrio kitimas dėl drėgmės nuostolių kietėjimo metu. Vanduo betone juda kapiliarais, o kapiliarinės jėgos stengiasi suvienodinti drėgmės kiekį su aplinka. Sparčiausiai šie procesai vyksta plonuose, didelio paviršiaus ploto gaminiuose (Gribniak et al., 2013).

Tyrimais analizuoti veiksniai, turintys įtakos džiūstančio betono susitraukimui (De Larrard & Sedran, 1994): užpildų rūšis (žvyras, skalda, smėlis), vandens ir cemento santykis (V/C), santykinis oro drėgnis ir gaminio matmenys. Nustatyta, kad stambesnė užpildų frakcija mažina betono traukumą. Taip pat užpildai, pasižymintys didesniu tamprumo moduliu ar šiurkščiu paviršiumi, yra atsparesni susitraukimui. Pastebėta tiesioginė priklausomybė: kuo didesnis V/C santykis, tuo

intensyvesnis susitraukimas, kartu mažėjant betono stipriui bei standumui. Gaminio matmenys taip pat svarbūs – masyvesnėse konstrukcijose susitraukimo efektas yra mažesnis.

Vienas efektyviausių būdų valdyti šiuos procesus – specialių priedų naudojimas. Atlikti tyrimai patvirtino, kad tinkamai parinktos įmaišos gali veiksmingai sumažinti savaiminį betono susitraukimą (Meddah et al., 2011).

Mokslininkai tyrė susitraukimą mažinančių priedų poveikį baltam savaimės susitankinančiam betonui. Tyrimo metu į mišinius buvo dedami plėtriejai ir susitraukimą mažinantys priedai bei hidrofobinės įmaišos. Nustatyta, kad efektyviausias rezultatas ir mažiausias susitraukimas pasiekiamas vienu metu naudojant plėtriuosius priedus ir susitraukimą mažinančias įmaišas (Corinaldesi, 2012).

Kiti autoriai analizavo plėtriuųjų priedų ir susitraukimą mažinančių įmaišų poveikį betono traukumui. Gauti rezultatai parodė, kad taikant šiuos priedus savaiminė betono trauktis tampa labai nežymi. Taip pat pastebėta sinergija tarp susitraukimą mažinančių įmaišų ir plėtriuųjų priedų, nors pažymėtina, kad susitraukimą mažinanti įmaiša lėtina mišinio rišimąsi (Oliveira et al., 2014).

Remiantis atliktais tyrimais, susitraukimą mažinantys priedai rekomenduojami situacijose, kai betono traukumas gali sukelti ilgaamžiškumo problemų. Šių įmaišų sudėtyje dažniausiai būna etilenglikolio junginių, kurie veikia betono porų struktūrą ir riboja vandens garavimą, taip mažindami tūrio pokyčius. Tačiau šie priedai gali neigiamai veikti betono stiprį: tyrimai rodo, kad po 28 kietėjimo parų stiprio sumažėjimas gali siekti 12–15 % (Dransfield, 2003).

Tiriant susitraukimą mažinančių įmaišų įtaką savaimės susitankinančio betono savybėms, nustatyta, kad jos nedaro poveikio paties mišinio susitankinimo procesui. Pastebėta tiesioginė priklausomybė: didinant įmaišos kiekį, susitraukimas mažėja, tačiau kartu proporcingai mažėja ir betono stipris (Maia et al., 2012).

Taip pat atlikti tyrimai su skirtingų tipų glikolio pagrindu pagamintais priedais. Nustatyta, kad ilgalaikis susitraukimas, palyginti su kontroliniais bandiniais, sumažėjo apie 50–56 %. Analogiški bandymai su vaško pagrindu pagamintais priedais parodė gerokai mažesnę efektyvumą – susitraukimas sumažėjo tik apie 13 % (Gettu et al., 2000).

Tvari statybinė medžiaga turi būti ilgaamžė ir turėti kuo ilgesnį gyvavimo ciklą. Tam, kad naudojant antrines žaliavas betono gamyboje ir norint užtikrinti betono ilgaamžiškumą, būtų galima jų sudėtyse panaudoti medžiagas pagerinančias sukietėjusio betono savybes. Vienos iš tokių medžiagų gali būti kristalizuojantys priedai. Paprastai, kristalizuojantys priedai taikomi vandens įgėriui mažinti arba kaip hidroizoliacinė medžiaga betono gamyboje, nes jų dozavimas yra paprastas ir ekonomiškai pagrįstas (Zhang et al., 2023). Šie betono priedai savo sudėtyse turi cheminių junginių, kurie gali reaguoti su cemento hidratacijos produktais, susidarę naujadarai užpildo poras ir tampa cementinės matricos dalimi ir sutan-

kina jos struktūrą bei padaro cementinius kompozitus atsparesnius agresyvių medžiagų skverbimuisi (Tibbetts et al., 2021). Mokslininkai (Wang et al., 2018) taip pat nustatė, kad kristalizuojantys priedai cementiniuose kompozituose gali sumažinti dujų pralaidumą bei skatina įtrūkių užsitraukimą. Kristalizuojantys priedai gali skatinti tolesnes hidratacijos ar pucolanines chemines reakcijas, kad uždarytų trūkius, nes medžiagos iš susidariusių trūkių yra panašios cheminės sudėties kaip ir hidratacijos produktai (Oliveira et al., 2021). Pastebėta, kad kristalizuojantys priedai gali efektyviai užauginti kristalus įtrūkimų vietose, kurių plotis yra mažesnis nei 0,1 mm, bet didėjant trūkio pločiui efektyvumas mažėja (Jaroenratanapirrom et al., 2011). Norint giliau tyrinėti trūkių užgydymą ir atsparumą agresyvioms medžiagoms, kristalizuojantys priedai buvo dedami į betoną ir nustatyta, kad šie priedai padidino bandinių gniuždomąjį stiprį ir buvo atsparesni chloridų jonų įsiskverbimui (Mi et al., 2023). Kristalizuojantys priedai mažina betono vandens įgėrį, sumažina agresyvių medžiagų ir dujų skverbimąsi, padeda užgydyti trūkius, tad gali pagerinti betono ilgaamžiškumą. Dėl to vanduo ir agresyvios medžiagos nebegali prasiskverbti į cementinę matricą ir sukelti irimo, kurį lemia šaldymo-atšildymo ciklai, ASR reakcijos, armatūros ar sulfatinė korozija (Ou et al., 2021).

1.5. Technologinių atliekų poveikis betono ilgaamžiškumui

Viena pagrindinių betono savybių yra gebėjimas priešintis ilgalaikės eksploatacijos poveikiams. Dėl gebėjimo atlaikyti įvairius aplinkos veiksnius ir ilgą laiką išlaikyti nepakitusias charakteristikas, betonas statybų sektoriuje yra nepakeičiama medžiaga. Svarbiausi ilgaamžiškumą apibūdinantys rodikliai yra atsparumas šalčiui (veikiant tiek jūros vandens, tiek ledą tirpdančioms druskoms), agresyviams cheminiams poveikiui, dilumui bei karbonizacijai. Siekiant užtikrinti konstrukcijų ilgaamžiškumą, būtina tiksliai suprojektuoti mišinio sudėtį ir parinkti tinkamas žaliavas. Tam reikia išsamiai ištirti, kaip skirtingos medžiagos veikia betono savybes. Atliekų poveikis taip pat turi būti nuodugniai išanalizuotas, siekiant įsitikinti, kad jų naudojimas nepakenks eksploatacinėms charakteristikoms.

Vertinant betono ilgaamžiškumą, būtina ištirti sudedamųjų dalių reaktyvumą šarminėje aplinkoje. Stiklo daleles sudaro amorfinis silicio dioksidas, kuris linkęs reaguoti su šarmais, o tai lemia dalelių tūrio didėjimą. Šis procesas vadinamas šarmų ir silicio dioksido reakcija (angl. *Alkali-Silica Reaction*, ASR). Naudojant stiklo atliekas betone, privaloma nustatyti ASR riziką (Pezeshki et al., 2018). Pastebėta, kad šią reakciją veikia daugybė veiksnių: stiklo dalelių dydis, kiekis, bei papildomos cementinės medžiagos (SCM) (Lu et al., 2019; Bisht et al., 2018). Nors didesnis stiklo kiekis įprastai skatina ASR (Harbec et al., 2017), šią riziką

galima suvaldyti į sudėtį įmaišant tokių pucolaninių priedų kaip metakaolinas ar lakieji pelenai (Wang et al., 2010).

Kita svarbi ilgaamžiškumą veikianti savybė yra vandens įgeris. Galima daryti prielaidą, kad kuo mažesnis įgeris, tuo gaminys bus ilgaamžiškesnis. Žymiai padidėjęs vandens įgeris gali turėti neigiamą poveikį betono funkcionalumui, ypač atsparumui šalčiui (Tamanna et al., 2020). Tyrimai rodo, kad betono su stiklo atliekomis vandens įgeris yra mažesnis (Naganathan et al., 2015; Meddah et al., 2011; Maage, 1984). Tokius rezultatus lemia tai, kad pačių stiklo dalelių vandens įgeris yra mažesnis nei gamtinių užpildų

Kita ne mažiau svarbi betono ilgaamžiškumo savybė – susitraukimas. Specialūs technologiniai priedai gali būti naudojami siekiant sumažinti šį reiškinį. Teigiamas priedų poveikis mažinant savaiminį betono susitraukimą įrodytas gausiais tyrimais (Musikant, 2003; Rashad, 2014; Du et al., 2013). Ankstesnėse studijose vertinta kristalizuojančių priedų kiekio įtaka bandinių susitraukimui, poringumui, fizikinėms ir mechaninėms savybėms. Nustatyta, kad mažiausiai per 190 dienų susitraukė bandiniai, kurių sudėtyje buvo 0,9–1,0 % priedo. Padaryta išvada, kad kristalizuojantys priedai apsaugo bandinio struktūrą nuo mikrotrūkių susidarymo (Guo et al., 2020).

Šarmų ir užpildų reakcija (angl. *Alkali-Aggregate Reaction*, AAR), dažnai vadinama šarmine korozija, yra viena dažniausiai pasitaikančių betono irimo formų (Abbas, 2023; Sahin, 2024). Ją sukelia cemente esančių šarmų jonų (Na^+ , K^+ , OH^-) sąveika su reaktyviuoju (amorfiniu ar silpnai kristaliniu) silicio dioksidu, esančiu užpilduose (Antolik et al., 2023). Šios reakcijos intensyvumas priklauso nuo regiono klimato, vietinių žaliavų specifikos bei betono komponentų savybių, todėl tyrimai dažniausiai pritaikomi konkrečios vietovės sąlygoms įvertinti. Priklausomai nuo dalyvaujančių mineralų, procesai skirstomi į šarmų-silicio (ASR) ir šarmų-karbonatų (ACR) reakcijas. Pirmąjį procesą dažniausiai inicijuoja užpildai, turintys reaktyvių silicio mineralų (Kawabata et al., 2013). Antrasis procesas vyksta naudojant tam tikrus karbonatinius užpildus, pavyzdžiui, dolomitą, tačiau šarmų-karbonatų reakcijos yra gerokai retesnės (Ingham, 2010).

Betono pažeidimų dėl šarminės korozijos vertinimas grindžiamas įvairiomis metodikomis, leidžiančiomis analizuoti medžiagos sudėtį ir stebėti konstrukcijos būklę. Laboratoriniuose tyrimuose analizuojami iš konstrukcijų paimti bandiniai, nustatant komponentus, galinčius sukelti koroziją. Dažnai atliekama paviršiaus analizė spektroskopijos ar mikroskopijos metodais korozijos produktams identifikuoti. Taip pat vertinama chloridų koncentracija, nes jų kiekis reikšmingai padidina suirimo riziką. Pažeidimams aptikti dažnai taikomi neardomieji metodai: ultragarso impulso sklaidimo greičio matavimas, radiografija ar elektrinio laidumo tyrimai. Vertinant apsaugines priemones, pavyzdžiui, specialias dangas, siekiama izoluoti statybines medžiagas nuo agresyvios aplinkos poveikio ir užkirsti kelią tolesniam struktūros ardymui.

Betono sudėtis yra kritinis veiksnys šarmų ir užpildų reakcijai (šarminėi korozijai) atsirasti. Norint geriau suvokti šio proceso mechanizmą, būtina įvertinti, kaip įvairūs komponentai veikia medžiagos atsparumą agresyvioje aplinkoje. Šarminių junginių kiekis tiesiogiai priklauso nuo cemento sudėties; jį galima modifikuoti pasirenkant tinkamą cemento tipą arba naudojant mineralinius priedus. Chloridai taip pat yra reikšmingi – jie į betoną patenka iš aplinkos (per drėgmę ar agresyvias chemines medžiagas), ypač jei apsauginės dangos yra pažeistos. Sumažinus chloridų koncentraciją, galima reikšmingai sumažinti ir korozijos pavojų.

Poringumas – dar viena svarbi savybė: didelis betono poringumas palengvina drėgmės ir šarminių jonų skverbtį, o tai spartina degradacijos procesus. Priešingai, tankesnis betonas pasižymi didesniu atsparumu. Kai kurios medžiagos, pavydžiui, šarminio stiklo priedai, gali padidinti betono šarminį aktyvumą, todėl būtina atsakingai projektuoti mišinių sudėtis ir nuolat stebėti statinių būklę. Reguliari priežiūra bei laiku atliekamas remontas gali gerokai pratęsti konstrukcijos eksploatavimo laiką (Vektaris ir Vilkas, 2006).

Naudojant inertinius užpildus, šarminės korozijos riziką galima sumažinti, tačiau jų prieinamumas dažnai ribotas dėl geografinės padėties ar didelės kainos. Žinoma, kad daugelis aliumosilikatinių užpildų (pavyzdžiui, smiltainis ar skalūnas) reaguoja su šarmais, sukeldami betono plėtimąsi ir trūkius (Gillot et al., 1973). Kitas būdas išvengti šių reakcijų – sumažinti betono pH vertę. Tai pasiekama naudojant tinkamas technologines įmaišas, kurios slopina šarmų ir užpildų reakcijas (Kawamura et al., 1988; Duchesne ir Bérubé, 1994; Ferraris et al., 2000), arba renkantis cementą su mažesniu Na_2O ekvivalentu (Hobbs, 2000; Leming et al., 2000).

Šarminės korozijos prevencijai dažniausiai pasitelkiamos papildomos cementinės medžiagos (SCM), kuriomis keičiama dalis cemento: lakieji pelenai, mikrosilika (silicio mikrodulkės), maltas granuliuotas aukštakrosnių šlakas ir kt. Populiariausias priedas – lakieji pelenai; jų slopinimo mechanizmas apima šarmų koncentracijos mažinimą, jų surišimą, molekulių migracijos ribojimą bei reakcijoms būtino $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sunaudojimą (Bleszynski et al., 1998; Hay et al., 2021). Dar viena efektyvi priemonė – stiklo atliekos (Fanijo et al., 2021). Tyrimai rodo, kad naudojant stiklo atliekas vietoj stambiųjų užpildų, korozijos rizika gali net išaugti, tačiau ribojant stiklo dalelių dydį (iki $75 \mu\text{m}$), jos padeda išvengti neigiamų pasekmių ir pagerina betono ilgaamžiškumą (Yan et al., 2021; Jiang et al., 2021).

1.6. Betono anglies dioksido emisijos vertinimas naudojant papildomas cementines medžiagas

Betono mišiniai ir betonas yra labai plačiai naudojama statybinė medžiaga, kurios poreikis kasmet didėja. Projektuotojų ji pasirenkama dėl tokių savo savybių kaip

stipris, ilgaamžiškumas ir ekonomiškumas. Todėl naudojama ir daugelyje statybos sričių – gyvenamųjų namų statyba, komercinės paskirties pastatų statyba, kelių ir tiltų įrengimas ir pan. Šiandien visose statybos sektoriaus srityse prioritetas teikiamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų mažinimui, siekiant projektuoti ir statyti konstrukcijas, darančias kuo mažesnę poveikį aplinkai. Didėjantis dėmesys mažai CO₂ išskiriančioms statybinėms medžiagoms reikšmingai prisideda prie emisijų mažinimo pasauliniu mastu. Statybos pramonė yra tarši pramonės sritis, kuri išskiria 23% pasaulinių CO₂ emisijų (Thomas, 2018). Šį skaičių bandoma sumažinti pasitelkiant įvairius tyrimus ir antrinių žaliavų naudojimą, siekiant užtikrinti pagrindines betono savybes ir priimti tvarius sprendimus.

Vienas iš būdų spręsti tvarumo problemas betono gamyboje yra naudoti cementą pakeičiančias medžiagas. Didžioji dalis CO₂ emisijų betono gamyboje tenka cementui, nes jo gamyba pasižymi dideliu energijos poreikiu ir augančiomis gamybos apimtimis. Mažinti naudojamo cemento kiekius galima pasitelkiant medžiagas, kurios yra pucolaniškai aktyvios (Jannat et al., 2022). Tai medžiagos, kurios būna sudarytos iš silicio arba silicio ir aliuminio junginių, kurie gali reaguoti su kalcio hidroksidu Ca(OH)₂, kuris yra cemento hidratacijos produktas. Reaguojant šioms medžiagoms susidaro pagrindiniai mineralai – kalcio silikatai, kurie didina atsparumą druskoms, sulfatams ir chloridams (Tariq et al., 2013). Šių medžiagų įtraukimas į betono gamybą grindžiamas nuolatiniais moksliniais tyrimais ir vis griežtesniais aplinkosauginiais reikalavimais. Vienos iš tokių medžiagų, kurios gali padėti mažinti naudojamo cemento kiekį yra atliekos iš stiklo pramonės. Stiklo atliekų perdirbimas padeda mažinti jų kaupimąsi sąvartynuose. Smulkintas stiklas, kaip viena iš stiklo atliekų rūšių, pritaikytas pagrindų ir asfalto užpildui, taip pat kaip papildoma rišamoji medžiaga cementinių kompozitų gamyboje (Khan et al., 2020). Kaip cemento pakaitinė medžiaga dažniausiai tiriamas maltas stiklas, kurio dalelės būna smulkesnės nei cemento. Jis dažniausiai yra sudarytas pagrinde iš amorfinio silicio dioksido ir mažesnių kiekių kalcio ir natrio oksidų. ASTM C 618 ir NP 4220 standartai leidžia maltą stiklą, pagal jo cheminę sudėtį, priskirti pucolaninėms medžiagoms (Matos et al., 2016). Todėl nemažas kiekis mokslininkų tyrė malto stiklo atliekų, kaip cemento pakaitalo, naudojimą cementiniuose kompozituose (Nunes et al., 2013). Dėl didesnio šarmų kiekio, stiklo atliekų naudojimas kelia diskusijas. Dėl galimų ASR reakcijų buvo tiriama ir nustatyta, kad labai mažos dalelės nedalyvauja šiose reakcijose (Bignozzi et al., 2015). Taip pat pagal atliktus tyrimus nustatyta, kad mikrometrų dydžio dalelės, gali net mažinti ASR reakcijų atsiradimo riziką (Schwarz et al., 2008). Malto stiklo naudojimas vietoj cemento, nepaveikia betono konsistencijos arba net truputį gali pagerinti cementinių kompozitų apdirbamumą (Islam et al., 2017), kiti mokslininkai pastebėjo, kad šios savybės taip pat gali priklausyti ir nuo stiklo milietelių savybių bei tipo (Kamali et al., 2016). Taip pat ištirta, kad smulkesnės stiklo dalelės pagerina betono stiprumines savybes (Abbas et al., 2021), o naudojant

stambesnes stiklo daleles stipruminės savybės yra mažesnės (Taha et al., 2008). Kito tipo stiklo atliekos yra stiklo šlamas, kuris dar nėra labai plačiai ištirtas. Pasitebėta, kad stiklo šlamas gali pagerinti atsparumą šalčio poveikiui (Lee et al., 2018). Taip pat jis gali sumažinti ASR reakciją cementiniuose kompozituose (Kim et al., 2015).

Kitas būdas paversti betoną tvaresne medžiaga yra pakeisti įprastai naudojamus gamtinius išteklius perdirbtomis medžiagomis. Mažesnis natūralių resursų naudojimas gali reikšmingai prisidėti prie mūsų aplinkos išsaugojimo (Hanif et al., 2017). Atliekos taip pat yra gaunamos ir betono gamybos pramonėje, o galimybė jas naudoti gali prisidėti prie tvaresnio betono gamybos.

Gaminamo betono kiekiai kiekvienais metais didėja. Remiantis vieno tyrimo duomenimis, 2018 m. apie 30 tūkst. betono gamyklų pagamino 915 mln. m³ betono mišinio (European Ready Mixed Concrete Organization, 2019). Tame pačiame Europos betono mišinių gamintojų organizacijos (angl. *European Ready-mixed concrete organization*) tyrime apskaičiuota, kad organizacijai priklausančių šalių betono mišinių gamintojai sunaudavo 260 mln. tonų cemento. Didelis cemento suvartojimas lemia reikšmingą poveikį aplinkai, nes ši pramonės šaka pasižymi didele tarša ir didelėmis CO₂ emisijomis (Imbabi et al., 2012). Norint pagaminti vieną toną portlandcemento, į aplinką yra išmetama maždaug 0.9 t CO₂ (Djamaluddin et al., 2019).

Tvari plėtra sulaukia vis didesnio dėmesio, prie jos įgyvendinimo prisideda tiek mokslininkai, tiek verslo atstovai. Šią sritį dažniausiai sudaro aplinkos tausojimas, gamtos apsauga ir energijos resursų naudojimo mažinimas. Racionalesnis energijos resursų naudojimas yra viena plačiausiai tiriamų sričių. Pramonės sritys, kuriose yra sunaudojami dideli enegijos kiekiai, atkreipia didelį visuomenės dėmesį. Viena tokių sričių – cemento gamybos pramonė. Cemento gamybos tvaramo klausimas tampa vis svarbesnis dėl aplinkosauginių iššūkių ir augančių kainų, kurios daro įtaką statybos produktų brangimui.

Betonas yra viena plačiausiai naudojamų statybinių medžiagų, kurios vartojimas kasmet auga. Projektuotojai šią medžiagą renkasi dėl tokių savybių kaip stipris, ilgaamžiškumas bei ekonomiškas, todėl ji plačiai taikoma gyvenamųjų ir komercinių pastatų statybai, kelių bei tiltų įrengimui ir kitoms konstrukcijoms. Šiandien statybos sektoriuje prioritetas teikiamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisijų mažinimui, siekiant projektuoti mažesnį poveikį aplinkai darančias konstrukcijas. Statybos pramonė yra itin tarši – ji generuoja apie 23 % pasaulinės CO₂ emisijos (Thomas, 2018). Rodiklių mažinimas grindžiamas antrinių žaliavų taikymu, leidžiančiu užtikrinti tvarius sprendimus ir išlaikyti esmines betono savybes.

Dėl Europos žaliojo kurso ir klimato kaitos tikslų tampa vis svarbiau tiksliai nustatyti bei interpretuoti CO₂ emisijų rodiklius. Pavyzdžiui, palyginti C40/45 stiprio klasės betono sudėtis, kuriose kaip rišiklis naudotas geopolimeras arba

portlandcementis, nustatyta, kad emisijos atitinkamai siekia $320 \text{ kg CO}_2\text{/m}^3$ ir $354 \text{ kg CO}_2\text{/m}^3$ (Louise et al., 2013). Aukštesnės C45/55 klasės betono emisija, remiantis būvio ciklo inventorizacijos duomenimis, siekia $496,5 \text{ kg CO}_2\text{/m}^3$ (Thorne et al., 2024). Kiti tyrimai (Cong et al., 2024) rodo, kad didėjant betono stiprio klasei (nuo C30/37 iki C50/60), emisijos vidutiniškai išauga $16,7\text{--}19,6 \text{ kg CO}_2\text{/m}^3$. Vis dėlto šie rodikliai gali kisti priklausomai nuo regiono, žaliavų specifikos ir šalyje taikomų receptūrų.

Vienas efektyviausių būdų mažinti betono emisijas – naudoti papildomas cementines medžiagas (PCM), kuriomis keičiamas tradicinis portlandcementis. PCM taikymas laikomas viena svarbiausių kryptių kuriant mažai CO_2 išskiriantį betoną (Busch et al., 2022). Dalį portlandcemenčio 30 % pakeitus lakiaisiais pelenais, galima sumažinti emisijas apie $160 \text{ kg CO}_2\text{/m}^3$, tačiau tai neigiamai veikia ankstyvąjį gniuždomąjį stiprį (Celik et al., 2015). Naudojant iki 30 % granuliuto aukštakrosnių šlako (GGBS) C50/60 klasės betonuose su perdirbtais užpildais stebimas tolygus stiprio augimas (Wang et al., 2023). Taip pat tirti optimalūs raudonojo šlamo kiekiai, silicio mikrodulkių (SF) įtaka (Jiang et al., 2024) bei natūralūs vulkaniniai pelenai (Hossain et al., 2021). Nustatyta, kad net plytų miltų ar padangų gumos atliekų priedai (po 5 %) gali padėti išlaikyti mechanines savybes kartu mažinant taršą (Sinkhonde et al., 2024). Nors laboratoriniai tyrimai patvirtina PCM efektyvumą, praktinis jų taikymas realiose gamyklose išlieka iššūkiu, nes gamybinėmis sąlygomis gali prireikti didesnių priedų kiekių norint pasiekti identišką fizikines bei mechanines charakteristikas.

Skirtingi regionai susiduria su problema, kad papildomos cementinės medžiagos (PCM) ne visur yra lengvai prieinamos, o jų gabenimas taip pat didina šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Nustatyta, kad transportuojant lakiuosius pelenus $15,1\text{--}504 \text{ km}$ atstumu, betono emisijos padidėja nuo 3,9 % iki 11 %, palyginti su atvejais, kai žaliavų transportuoti nereikia (Sabau et al., 2021). Atliekant būvio ciklo analizę (LCA), vertinti itin ilgi lakiųjų pelenų gabenimo atstumai (2655 km ir $15\ 110 \text{ km}$), medžiagas transportuojant automobiliais bei laivais. Šis tyrimas neparodė vienareikšmiškos CO_2 emisijų mažėjimo tendencijos tais atvejais, kai logistikos grandinė buvo itin ilga (DeRousseau et al., 2020).

Išsamių studijų, vertinančių stiklo atliekų naudojimą betone ir jų poveikį CO_2 emisijoms, vis dar trūksta. Stiklo atliekų teigiamas poveikis betono savybėms ir ilgaamžiškumui leidžia teigti, kad ši žaliava taip pat gali prisidėti prie CO_2 emisijų ir neigiamo poveikio aplinkai mažinimo. Mokslininkai, pasitelkę dirbtinį intelektą ir išanalizavę gausius bandymų su stiklo atliekomis duomenis, padarė išvadą, kad ši medžiaga betoną daro tvaresnį. Pirmiausia, stiklo atliekų naudojimas leidžia sumažinti pirminių žaliavų poreikį, jų kainas ir padidinti rinkos tvarumą. Antra, pagerėjęs betono ilgaamžiškumas tiesiogiai mažina bendrąjį poveikį aplinkai. Trečia, perdirbtų medžiagų naudojimas padeda įgyvendinti pasaulinius emisijų

mažinimo tikslus. Galiausiai, stiklo atliekų integracija į gamybą mažina rūšiuojamų atliekų kiekius ir jų tvarkymo kaštus, sąvartynų apkrovą ir tiesiogiai prisideda prie žiedinės ekonomikos plėtros (Huang et al., 2021).

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Apibendrinus literatūros apžvalgą ir analizę, padarytos šios išvados:

1. Atlikta technologinių mineralinių atliekų charakteristikų literatūrinė analizė pagrindžia jų tinkamumą betono gamybai: pucolaninis aktyvumas, dalelių specifinis paviršiaus plotas ir mineralinė sudėtis leidžia šiomis atliekomis pakeisti iki 20–25 % portlandcemenčio masės, užtikrinant galutines produkto mechanines savybes.
2. Stiklo atliekos gali būti įtraukiamos į betono sudėtį. Priklausomai nuo dalelių dydžio, jos atlieka stambiojo ar smulkiojo užpildo arba rišamosios medžiagos funkciją. Nustatyta, kad stiklo atliekos, kurių dalelių dydis nesiekia 75 μm , mažina šarminę koroziją betone.
3. Betono šlame dominuoja hidratuotos cemento dalelės, kurios sudaro apie 50 %, ir nedidelis kiekis smėlio smulkelių, kurios sudaro apie 40 %. Betono šlamos gali būti naudojamas kaip smulkusis užpildas iki 10 %, tačiau jis neigiamai veikia mišinio konsistenciją ir didina mechaninių savybių svyravimus.
4. Apie 1 % kristalizuojančių priedų naudojimas didina betono ilgaamžiškumą ir mažina susitraukimą, nes mažėja vandens įgeriamumas, kinta porų struktūra ir didėja atsparumas aplinkos poveikiui. Didesni priedų kiekiai nerekomenduojami, nes didėjantis laisvojo vandens poreikis gali neigiamai paveikti cemento hidrataciją.
5. Cemento keitimas antrinėmis aktyviomis mineralinėmis medžiagomis, tokiomis kaip granuliuotas aukštakrosnių šlakas ar lakieji pelenai, iki 30–50 % didina betono ilgaamžiškumą bei mažina kietėjimo temperatūrą, tačiau viršijus šią ribą stebimas neigiamas poveikis fizikinėms ir mechaninėms savybėms.
6. Mineralinių atliekų, tokių kaip lakieji pelenai, granuliuotas aukštakrosnių šlakas, metakaolinas, biokuro pelenai ir silicio mikrodulkės, naudojimas leidžia 20–25 % sumažinti portlandcemenčio kiekį betono mišiniuose, užtikrinant ne tik gamtinių išteklių taupymą, bet ir gerinant fizikines mechanines savybes. Vandens įgeriamumo ir gniuždomojo stiprio stabilumo

rodikliai rodo 15–19 % mažesnę poveikį aplinkai (pagal CO₂ emisijų skaičiavimus) ir efektyvų antrinių žaliavų utilizavimą.

Remiantis literatūros apžvalga ir analize, suformuluoti darbo uždaviniai:

1. Atlikti betono šlamo ir stiklo apdirbimo atliekos cheminės ir mineraloginės sudėties, taip pat fizikinių ir cheminių savybių analizę.
2. Ištirti stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo poveikį cemento tešlos reologinėms charakteristikoms bei cemento akmens mechaninėms savybėms ir mikrostruktūrinei kompozito sandarai.
3. Įvertinti stiklo apdirbimo atliekos, betono šlamo ir kristalizuojančio priedo poveikį sukietėjusio betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms, atsparumui šalčiui ir šarminei korozijai.
4. Nustatyti rekomenduojamus naudoti betono šlamo, kaip smėlio pakaitalo, ir stiklo apdirbimo atliekos, kaip cemento pakaitalo, kiekius kuriant atsparų šalčiui ir šarminei korozijai betoną.
5. Sukurti šalčiui ir šarminei korozijai atsparų betoną, apibūdinti jo fizikines ir mechanines savybes bei nustatyti poveikį aplinkai.

Naudotos žaliavos ir tyrimo metodai

Šiame skyriuje apžvelgiamos darbe naudotos medžiagos, pateikiamos jų savybės ir charakteristikos, mišinių sudėtys, naudotos rekomenduojamiems atliekų kiekiams nustatyti. Aprašomas bandinių formavimas ir taikyti tyrimo metodai. Skyriaus tematika kartu su bendraautoriais paskelbti 5 straipsniai (Nagrockiene et al. 2022, Pocius et al. 2023a, 2023b, 2024, 2025), tyrimų rezultatai pristatyti 7 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

2.1. Naudotos medžiagos

Šiame skyriuje aprašomos tyrimuose naudotos medžiagos: rišamoji medžiaga – cementas, smulkieji ir stambieji užpildai, technologiniai priedai ir vanduo. Taip pat analizuojamos antrinės žaliavos – stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamas, jų sudėtis bei galima cheminių ir fizikinių savybių įtaka eksperimentų rezultatams.

2.1.1 Cemento charakteristikos

Tyrimams naudotas portlandcementis CEM I 42,5 R, atitinkantis standarto LST EN 197-1:2011 reikalavimus. Gamintojo deklaruojama cheminė sudėtis ir fizikinės bei mechaninės cemento savybės pateikiamos 2.1 ir 2.2 lentelėse. Cementai, kurių dalelių dydis yra didesnis, reikalauja daugiau laiko sukietėjimui ir pasižymi

mažesniu ankstyvuju stiprumu bei mažesne hidratacine temperatūra, o vidutiniškai cemeneto dalelių dydis svyruoja tarp 12 – 14 μm (Nguyen et al., 2021).

2.1 lentelė. Portlandcemenčio cheminė sudėtis, %

Table 2.1. Chemical composition of Portland cement, %

Portlandcemenčio cheminė sudėtis, %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	Kiti
20,76	6,12	3,37	63,50	1,00	0,8	0,3	4,15

2.2 lentelė. Portlandcemenčio fizikinės ir mechaninės savybės

Table 2.2. Physical and mechanical characteristics of Portland cement

Savybės	Portlandcementis CEM I 42,5 R
Savitasis paviršius, cm ² /g	4470
Dalelių tankis, kg/m ³	2800
Piltinis tankis, kg/m ³	1220
Normalaus tirštumo tešla, %	26,5
Rišimosi pradžia, min	145
Rišimosi pabaiga, min	200
Gniuždomasis stipris po 7 parų kietėjimo, MPa	26,7
Gniuždomasis stipris po 28 parų kietėjimo, MPa	51,8

Remiantis 2.2 lentelėje pateiktais duomenimis, cemento fizikinės savybės atitinka standarto LST EN 197-1 reikalavimus. Pateiktas 51,8 MPa gniuždomasis stipris po 28 parų kietėjimo patvirtina, kad cementas atitinka 42,5 stiprio klasę.

2.1.2 Smulkaus užpildo charakteristikos

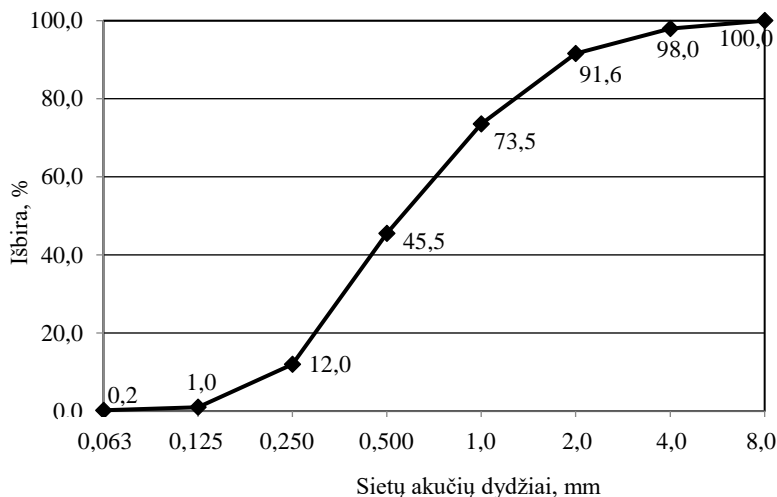
Tyrimams naudotas smulkusis užpildas – 0/4 mm frakcijos smėlis, atitinkantis standarto LST EN 12620:2003+A1:2008 reikalavimus. Gamintojo deklaruojami smėlio fizikinių savybių rodikliai pateikiami 2.3 lentelėje, mineralinė petrografinė sudėtis – 2.4 lentelėje, o granulimetrinė sudėtis – 2.1 pav. Smėlio smulkiųjų dalelių kiekio kategorija – f3, bendrosios sieros kiekio kategorija – S_{0,1}, rūgštyje tirpių sulfatų kiekio kategorija – AS_{0,2}.

2.3 lentelė. Smėlio fizikinės savybės**Table 2.3.** Physical characteristics of sand

Užpildas	Dalelių tankis, kg/m ³	Piltinis tankis, kg/m ³	Igėris, %
Smėlis 0/4 mm fr.	2660	1610	0,46

2.4 lentelė. Mineralinė-petrografinė smėlio sudėtis**Table 2.4.** Chemical composition of the sand

Kvarcas, %	Karbonatai, %	Lauko špatai, %
~54	~20	~17

**2.1 pav** Smėlio granulimetrinė sudėtis**Fig 2.1.** Particle size distribution of sand

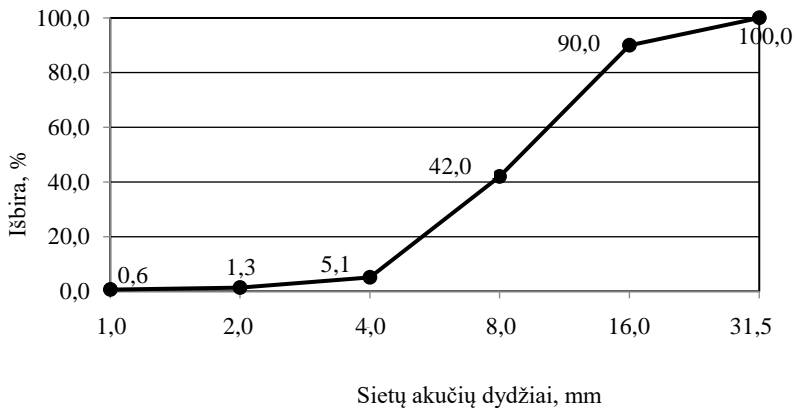
Bandymuose naudotas smėlis atitinka GF85 dalelių dydžio kategoriją ir granulimetriją. Smulkelių kiekis smėlyje – 0,8 %.

2.1.3 Stambaus užpildo charakteristikos

Tyrimų metu stambiajam užpildui parinkta 4/16 mm frakcijos dolomitinė skalda, atitinkanti LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus. Dolomito savybės pateikiamos 2.5 lentelėje, o granulimetrinė sudėtis – 2.2 pav.

2.5 lentelė. Dolomito skaldos savybės**Table 2.5.** Characteristics of crushed dolomite

Savybės	Dalelių tankis, kg/m ³
Dalelių tankis, kg/m ³	2800
Piltinis tankis, kg/m ³	1480
Įgėris, %	0,80
Smulkiųjų kiekių kategorija	f _{1,5}
Bendros sieros kiekio kategorija	S _{0,1}
Rugštyse tirpių sulfatų kiekio kategorija	AS _{0,2}
Mineralinė petrografinė sudėtis	dolomitas
Granulometrijos sudėties kategorija	G _{C90/15} ; G _{T17,5}
Plokštumo rodiklis	Fl ₁₅
Formos rodiklis	Sl ₁₅
Los Andželo koeficientas	LA ₂₀
Smūginis trupis	SZ ₁₈
Mikro Devalio koeficientas	M _{DE15}
Atsparumas paviršiaus dilinimui	AAV _{NR}
Užpildo atsparumas magnio sulfato poveikiui	MS ₁₈
Užpildo atsparumas šaldymui ir atšildymui	F ₁

**2.2 pav** Dolomito skaldos 4/16 mm fr. granulometrinė sudėtis**Fig. 2.2.** Particle size distribution of crushed dolomite fraction 4/16**2.1.4 Betono šlamo charakteristikos**

Betonui modifikuoti naudotas betono šlamos, susidaręs betono mišinių gamyklose plaukiant įrangą bei apdorojant iš statybos objektų grąžintus nepanaudoto betono likučius. Visos atliekos buvo išpilamos į saugojimo rezervuarus, kuriuose jos nuolat priverstinai maišomos.

Tiriant betono šlamą, ėminiai buvo imami iš saugojimo rezervuarų ir visiškai išdžiovinami. Nustatyta išdžiovintos medžiagos cheminė sudėtis pateikiama 2.6 lentelėje. Nustatytoje cheminėje sudėtyje taip pat nustatyta 32,42 % kaitinimo nuostolių. Kitos betono šlamo charakteristikos – 2.7 lentelėje.

2.6 lentelė. Betono šlamo cheminė sudėtis

Table 2.6. Chemical composition of concrete sludge

Betono šlamo cheminė sudėtis	CaO	40,9 %
	SiO ₂	14,9 %
	Al ₂ O ₃	3,14 %
	SO ₃	2,40 %
	Fe ₂ O ₃	2,37 %
	MgO	2,26 %
	K ₂ O	0,89 %
	P ₂ O ₅	0,38 %
	TiO ₂	0,21 %
	SrO	0,06 %
	MnO	0,04 %
	Cl	0,03 %

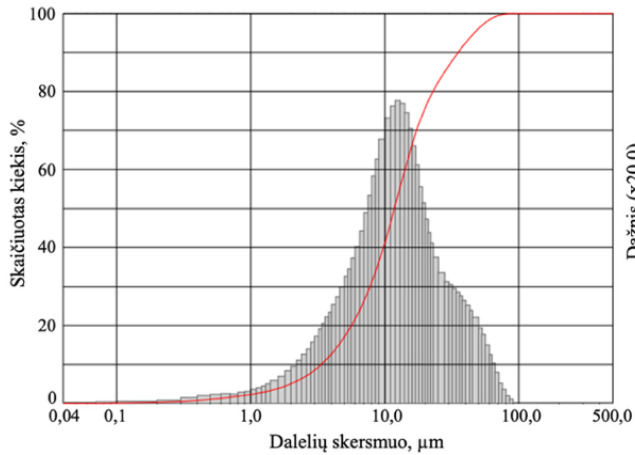
2.7 lentelė. Sauso betono šlamo charakteristikos

Table 2.7. Characteristics of concrete sludge

Charakteristikos	Vidutinė vertė
	Sausas betono šlamai
Savitasis paviršius, cm ² /g	316
Piltinis tankis, kg/m ³	826
Dalelių tankis, kg/m ³	2774
Pucolaninis aktyvumas	–

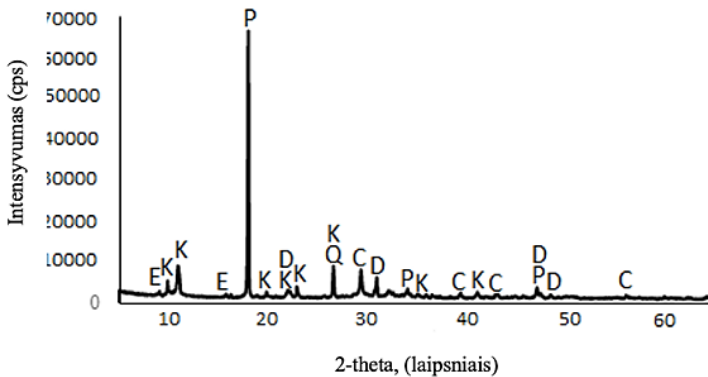
Atlikus tyrimus nustatyta, kad betono šlamo savitasis paviršiaus plotas yra gerokai mažesnis nei naudoto cemento. Taip pat nustatyta, kad šlamo piltinis tankis yra apie 30 % mažesnis, tačiau dalelių tankis išlieka beveik tapatus cemento dalelių tankiui.

2.3 pav. pateiktas sauso betono šlamo dalelių pasiskirstymas. Granulimetrinė sauso betono šlamo analizė parodė tai, kad daugiausia, šiuose bandymuose naudoto betono šlamo, pasitaikantis dalelių vidutinis dydis buvo 15,85 μm. 10 % dalelių buvo mažesnės nei 3,35 μm ir 10 % – didesnės nei 35,31 μm. Nustatyta, kad betono šlamai nėra pucolaniškai aktyvūs.



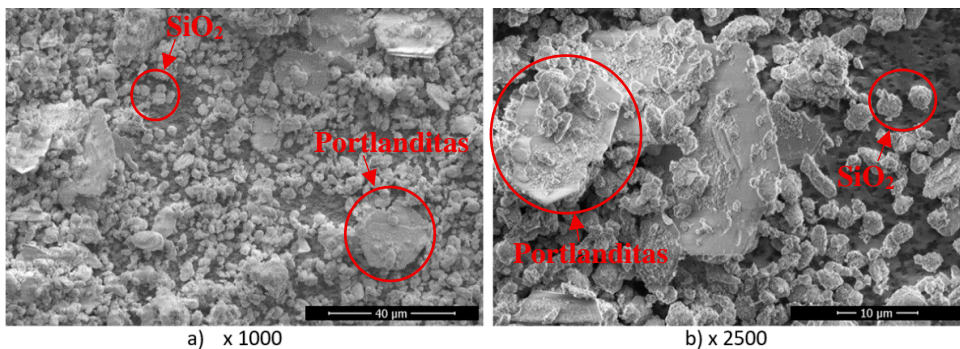
2.3 pav Betono šlamo dalelių pasiskirstymas
Fig. 2.3. Particle distribution of dry concrete sludge

Atlikus sauso betono šlamo rentgenostruktūrinę analizę galima matyti, kad jame daugiausia yra kalcito – 36 %, bet taip pat užfiksuota ir portlandito – 16 %, dolomito – 14 %, kvarco – 11 %, kuzelito – 7,6 % ir etringito – 3,8 %. 2.4 pav. pateikta sauso betono šlamo rentgenograma.



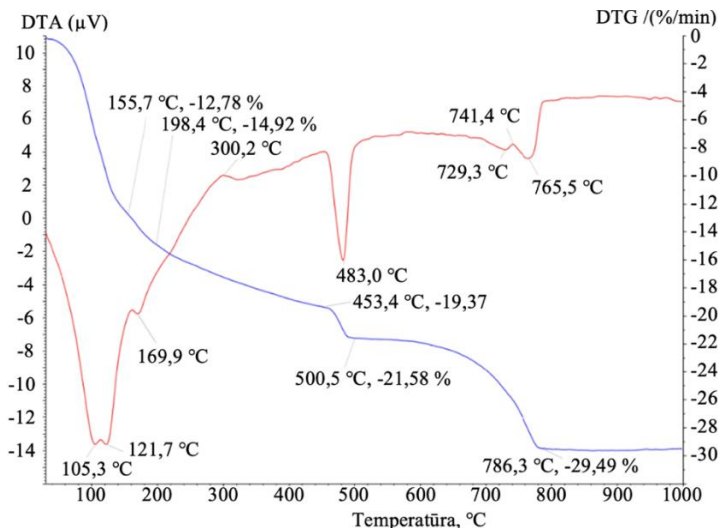
2.4 pav. Sauso betono šlamo rentgenograma: C – kalcitas (CaCO_3), P – portlanditas ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), D – dolomitas ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Q – kvarcas (SiO_2), E – etringitas ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), K – kuzelitas ($\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
Fig. 2.4. Dry concrete sludge x-ray; C – calcite (CaCO_3), P – portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), D – dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Q – quartz (SiO_2), E – etringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), K – kuzelite ($\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

Betono šlamo mikrostruktūra tirta naudojant SEM „Helios NanoLab 650“. Gauti rezultatai pateikti 2.5 pav. Mikrostruktūros nuotraukos rodo, kad sausą betono šlamą sudaro apvalios formos dalelės ir šešiakampės plokštelės. Pastarosios yra portlandito kristalai.



2.5 pav. Sauso betono šlamo dalelės: a) x1000 didinimas, b) x2500 didinimas
Fig. 2.5. Microstructure of the dry concrete sludge: a) x1000 magnification, b) x2500 magnification

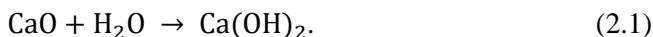
Taip pat sausam betono šlamui buvo atlikta termografinė analizė ir gauti rezultatai (2.6 pav.).



2.6 pav. Sauso betono šlamo termograma
Fig. 2.6. Termogravimetric curves of dry concrete sludge

Iš rezultatų matyti, kad 100–200 °C temperatūros diapazone vyksta intensyvus endoterminis procesas ir prarandama masė. Tai sietina su hidratuoto cemento mineralais, iš kurių išsiskiria kristalizacinis vanduo. 450–500 °C temperatūroje vyksta antrasis endoterminis procesas, atsirandantis dėl kalcio hidroksido skilimo. Trečiasis endoterminis efektas stebimas 600–790 °C temperatūroje – jo metu skyla kalcitas.

Betono šlamo pH vertė siekia 11,4; ji nustatyta pagal standarto LST ISO 4316:1997 reikalavimus. Aukštą betono šlamo pH lemia didelė disocijuotų kalcio oksidų koncentracija (pagal (2.1) formulėje nurodytą reakciją (Nicoleau et al., 2016)), kuri padidina elektrolitų koncentraciją tirpale. Taip pat, vadovaujantis LST EN 1008:2005 reikalavimais, nustatytas betono šlamo tankis bei sausųjų medžiagų kiekis. Nustatyta, kad šlapio betono šlamo tankis yra 1220 kg/m³. Įvertinus, kad betono šlamo kietųjų dalelių tankis yra 2774 kg/m³, o vandens – 1000 kg/m³, nustatyta, jog 1 kg šlamo sudaro 0,718 kg (71,80 %) vandens ir 0,282 kg (28,20 %) kietosios fazės. Šios vertės naudotos apskaičiuojant cemento tešlos ir betono mišinių sudėtis:



2.1.5. Stiklo apdirbimo atliekos charakteristikos

Tyrimuose naudotos stiklo apdirbimo atliekos, susidariusios stiklo pjovimo ir šlifavimo procesuose. Gamybos ciklo metu susidaranti suspensijos nuosėdos surenkamos naudojant specializuotą techninio vandens apdorojimo įrangą, kurioje, pasitelkiant flokulantus, vyksta dalelių koaguliacija, nusodinimas ir mechaninis atskyrimas nuo skystosios fazės. Siekiant užtikrinti medžiagos savybių stabilumą ir išvengti antrinės karbonizacijos ar kitų aplinkos poveikių, bandymams naudoti švieži stiklo atliekų ėminiai, paimti tiesiogiai po dehidracijos proceso. Išsamūs duomenys apie atliekos cheminę sudėtį pateikiami 2.8 lentelėje, kurioje matyti, jog medžiaga pasižymi palyginti dideliu kaitinimo nuostolių kiekiu (6,67 %). Tai gali būti siejama su flokulantų liekanomis arba hidratuotų junginių skaidymusi aukštoje temperatūroje. Fizikiniai parametrai, apibūdinantys dalelių morfologiją ir piltines savybes, apibendrinti 2.9 lentelėje.

2.8 lentelė. Stiklo apdirbimo atliekos cheminė sudėtis

Table 2.8. Chemical composition of glass processing waste

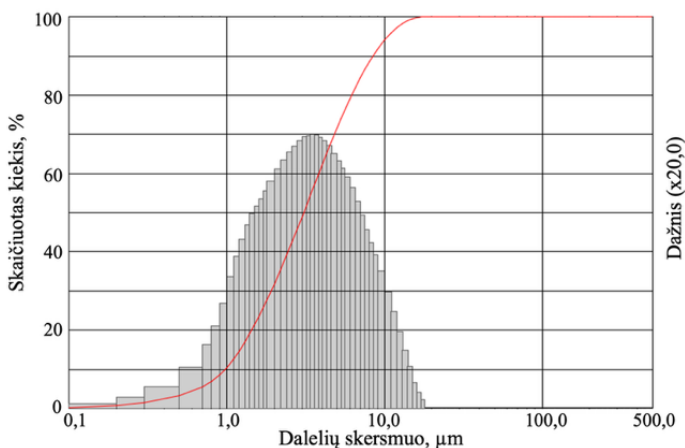
Stiklo apdirbimo atliekos cheminė sudėtis, %										
SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	CeO ₂	Fe ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Cl
69,0	10,4	8,68	3,55	0,93	0,24	0,15	0,148	0,11	0,074	0,027

2.9 lentelė. Stiklo apdirbimo atliekos charakteristikos

Table 2.9. Characteristics of glass processing waste

Charakteristikos	Vidutinė vertė
Savitasis paviršius, cm ² /g	6670
Piltinis tankis, kg/m ³	826
Dalelių tankis, kg/m ³	2500
Pucolaninis aktyvumas, mg/g	927

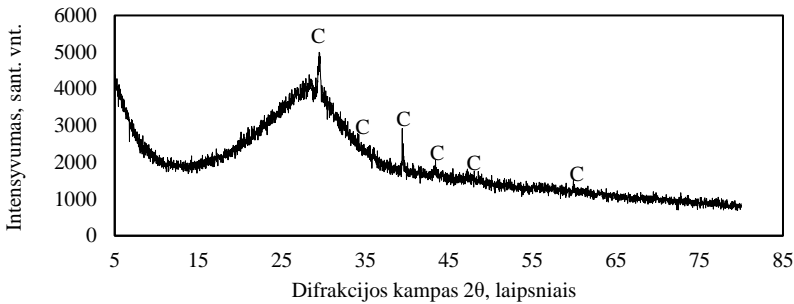
Išdžiovintos stiklo apdirbimo atliekos dalelių dydžio pasiskirstymas pateiktas 2.7 pav. Bandymų metu nustatyta, kad stiklo apdirbimo atliekoje daugiausia yra dalelių, kurių vidutinis dydis yra 3,98 μm. 10 % dalelių buvo mažesnės nei 0,98 μm ir 10 % – didesnės nei 8,44 μm. Gautas stiklo apdirbimo atliekos vidutinis dalelių dydis yra maždaug tris kartus mažesnis nei cemento.



2.7 pav. Stiklo apdirbimo atliekos dalelių pasiskirstymas

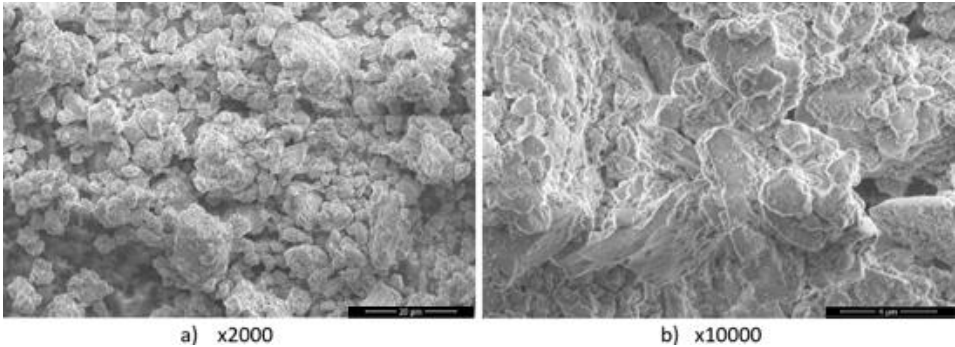
Fig. 2.7. Particle distribution of glass processing waste

Stiklo apdirbimo atliekų difrakcinės analizės rezultatai pateikti 2.8 pav. Rentgenogramoje identifikuoti tik kalcitui būdingi pikai, o tai indikuoja, jog tiriamąją medžiagą sudaro amorfinių bei smulkiakristalinių fazių junginiai, kurie nėra identifikuojami difrakcinės analizės būdu. Gauti duomenys koreliuoja su teorine stiklo chemine sudėtimi: dominuojantis amorfinis silicio dioksidas (sudarantis apie 70 % masės) rentgenogramoje pasireiškia plataus halo pavidalu (vadinamuoju „kalneliu“), o greta jo fiksuojami mažesni kiekiai natrio ir kalcio oksidų (Hasanuzzaman et al., 2016).



2.8 pav. Stiklo atliekos rentgenograma. C – kalcitas (CaCO_3)
Fig. 2.8. X-ray image of glass waste. C – calcite (CaCO_3)

Stiklo apdirbimo atliekos mikrostruktūros tyrimai taip pat atlikti taikant SEM metodą. Rezultatai pateikti 2.9 pav.



2.9 pav. Stiklo apdirbimo atliekos mikrostruktūra: a) x2000 didinimas,
 b) $\times 10\,000$ didinimas
Fig. 2.9. Microstructure of dry waste glass: a) x2000 magnification,
 b) $\times 10\,000$ magnification

Atlikus mikrostruktūros analizę (2.9 pav.) ir padidinus vaizdą 2000 kartų (a), identifikuotos vyraujančios netaisyklingos morfologijos dalelės. Padidinus vaizdą 10 000 kartų (b), matyti, kad stiklo apdirbimo atliekos pasižymi chaotiška kristalų orientacija erdveje. Šios netaisyklingos formos dalelės pasižymi dideliu kampuo-tumu ir nevienalyčiu paviršiumi, o tai būdinga mechaninio smulkinimo ir šlifavimo procesų metu susidarantioms antrinėms žaliavoms. Tokia fragmentuota struktūra ir skirtingomis kryptimis išsidėsčiusios dalelės gali turėti tiesioginės į-takos medžiagos savitajam paviršiaus plotui bei jos pucolaniniam aktyvumui.

2.1.6. Kristalizuojančio priedo charakteristikos

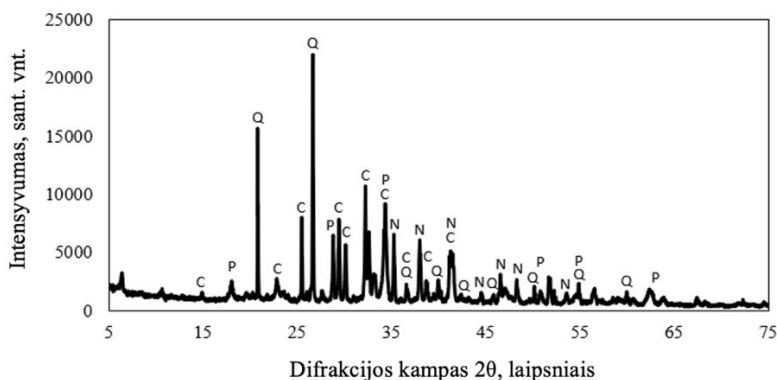
Tyrimuose naudotas miltelių pavidalo kristalizuojantis priedas, atitinkantis EN 934-2 standartą. Kristalizuojančio priedo cheminė sudėtis yra pateikta 2.10 lentelėje. Nustatytoje cheminėje sudėtyje taip pat nustatyta 28,19 % kaitinimo nuostolių.

2.10 lentelė. Kristalizuojančio priedo cheminė sudėtis

Table 2.10. Chemical composition of crystallising additive

Kristalizuojančio priedo cheminė sudėtis, %										
CaO	Na ₂ O	SiO ₂	SO ₃	ZnO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Cl
27,0	21,0	17,0	1,72	1,43	1,21	0,76	0,75	0,49	0,34	0,11

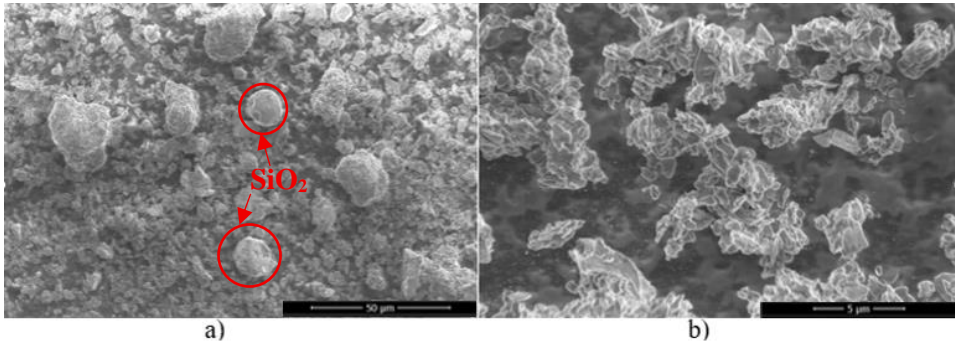
Rentgeno struktūrinės analizės rezultatai pateikti 2.10 pav. Nustatyta, kad kristalizuojantį priedą sudaro 32,7 % natrio karbonato, kuris skatina cemento hidracijos procesą, ypač C₃S mineralų hidraciją. Antroje vietoje pagal nustatytą kiekį yra kvarcas, kurio yra 31,4 %. Trečias pagal kiekį mineralas yra trikalčio silikatas – 29,4 %, o mažiausiai rasta portlandito, kurio kiekis priede sudaro 6,2 %.



2.10 pav. Kristalizuojančio priedo rentgenograma: N – natrio karbonatas (Na₂CO₃), C – trikalčio silikatas (Ca₃SiO₄O), Q – kvarcas (SiO₂), P – portlanditas (Ca(OH)₂)

Fig. 2.10. X-ray image of crystallising additive N – sodium carbonate (Na₂CO₃), C – tricalcium silicate (Ca₃SiO₄O), Q – quartz (SiO₂), P – portlandite (Ca(OH)₂)

Kristalizuojantį priedą ištyrus skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu, gautos mikrostruktūros nuotraukos (2.11 pav.).



2.11 pav. Kristalizuojančio priedo mikrostruktūra: a) padidinta 1000 kartų, b) padidinta 6500 kartų.

Fig. 2.11. Microstructure of glass sludge: a) $\times 1000$ magnification, b) $\times 6500$ magnification

Gautos mikrostruktūros nuotraukos rodo, kad medžiaga susideda iš netaisyklingos formos įvairaus dydžio dalelių. Tarp jų pastebimi smulkesni, apvalios formos silicio dioksido dalelės. Šie stebėjimai patvirtina rentgeno struktūrinės analizės rezultatus.

2.1.7. Technologiniai priedai ir vanduo

Kuriant betoną ir modifikuojant jo savybes bei siekiant užtikrinti tam tikras sukietėjusio betono savybes, naudojami technologiniai priedai. Bandymuose naudotos įmaišos. Superplastiklis PANTARHIT® RC 140 (FM) ir orą įtraukianti įmaiša PANTAPOR® 66 (LP), kurių savybės pateiktos 2.11 lentelėje.

Mišiniams naudotas geriamasis vanduo, atitinkantis standarto LST EN 1008 reikalavimus.

2.11 lentelė. Technologinių priedų savybės

Table 2.11. Characteristics of technological admixtures

Savybė	Superplastiklis	Orą įtraukianti įmaiša
pH vertė	6	10,5
Tankis	1,02 g/cm ³	1,00 g/cm ³
Šarmų kiekis	< 8,5 masės %,	< 1,0 masės %,
Chloridų kiekis	< 0,1 masės %	< 0,1 masės %

Atlikus pradinius bandymus su cemento akmeniu, nustatyti rekomenduojami atliekų kiekiai. Šie kiekiai po to naudoti maišant betono mišinius, kurių sudėtyje yra pateiktos 2.15 lentelėje. Pagamintos 7 skirtingos partijos bandinių, kur pati pirmoji partija buvo kontrolinė. Visose sudėtyse 5 % smėlio pakeista išdžiovintu betono šlamu, o 10 % geriamojo vandens – šlapiu betono šlamu. Kiekvienoje partijoje naudojamas vienodas kristalizuojančio priedo kiekis – 1 % nuo cemento masės.

2.15 lentelė. Betono mišinio sudėtys 1 m³
Table 2.15. Concrete mix designs for 1 m³

Žymuo Medžiaga	BS0	BS5	BS10	BS15	BS20	BS25	BS30
Stiklo apdirbimo atliekos, kg	0	20	40	60	80	100	120
Sausas betono šlamas, kg	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5
Šlapias betono šlamas, kg	16	16	16	16	16	16	16
Cementas, kg	400	380	360	340	320	300	280
Smėlis, kg	845,5	845,5	845,5	845,5	845,5	845,5	845,5
Dolomito skalda 4/16, kg	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040
Superlastiklis, kg	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Orą įtraukianti įmaiša, kg	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Kristalizuojantis priedas, kg	4	4	4	4	4	4	4
Vanduo, kg	144	144	144	144	144	144	144
V/R	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Stiklo apdirbimo atliekos kiekis skirtingose bandinių partijose didinamas, atitinkamai mažinant cemento dalį 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % ir 30 %. Visuose skirtinguose bandymų mišiniuose išlaikytas vienodas vandens ir rišamosios medžiagos santykis (V/R).

2.2.2. Cemento tešlos ir betono mišinių maišymas

Cemento akmens ir betono bandiniai buvo ruošiami naudojant išdžiovintas žalias. Visos sudėtinės medžiagos – cementas, smėlis, dolomitinė skalda, superplastiklis, orą įtraukianti įmaiša, vanduo, kristalizuojantis priedas, stiklo apdirbimo atliekos bei betono šlamas – dozautos pagal masę. Superplastiklis ir orą įtraukianti įmaiša prieš pilant į mišinį iš pradžių sumaišyti su vandeniu.

Cemento tešlai maišyti naudota priverstinio veikimo maišyklė; maišymo trukmė – 90 sekundžių. Tirtos kelios cemento tešlos sudėtys: pirmajame etape cementas iki 30 % keistas sausu betono šlamu, o kitose sudėtyse švarus vandentiekio vanduo iki 60 % keistas drėgnu betono šlamu.

Betono mišiniai taip pat ruošti priverstinio veikimo maišyklėje, o bendra maišymo trukmė sudozavus visas medžiagas siekė 90 sekundžių. Skirtingų sudėčių betono mišiniuose cementas iki 30 % keistas stiklo apdirbimo atliekomis. Šiuose mišiniuose naudotas pastovus sauso ir drėgno betono šlamo kiekis bei vienoda kristalizuojančio priedo dozė.

2.2.3. Cemento tešlos ir betono mišinių bandinių formavimas

Cemento akmens fizikinėms ir mechaninėms savybėms nustatyti buvo formuojamos cemento akmens prizmės (40×40×160 mm). Bandiniai buvo tankinami vibruojant ant vibracinės aikštelės 20±2 s. Formose bandiniai laikomi 24 val. 20±2 °C temperatūros aplinkoje, po to formos buvo išardomos ir bandiniai 27 paras 20±2 °C temperatūroje buvo kietinami vandenyje.

Iš betono mišinių buvo formuojami betono kubai plastikinėse ir metalinėse formose, kurių matmenys buvo 100×100×100 mm ir 150×150×150 mm. Betono mišinys buvo tankinamas naudojant vibro aikštelę, kiekvienas bandinys tankinamas 20 s. Bandiniai po 12 valandų kietėjimo drėgnoje aplinkoje, 20 ± 2 °C temperatūroje, buvo išformuojami ir sumerkiami į vandenį, kurio temperatūra 20 ± 2 °C. Bandiniai buvo kietinami 28 paras. Dviejų skirtingų matmenų bandiniai naudoti bandymams dėl skirtingų standartų metodikos reikalavimų.

2.3. Tyrimų metodikos

Šiame skyriuje pateikiama ir aprašoma tyrimų metodologija. Viena bandymų dalis atlikta vadovaujantis galiojančiais Europos Sąjungos standartais bei rinkos reikalavimais, o kita – taikant mokslinėje veikloje pripažintus tyrimų metodus medžiagų charakteristikoms nustatyti.

2.3.1. Naudotų medžiagų savybių nustatymo metodai

Savitotojo paviršiaus plotui ir dalelių dydžio pasiskirstymui nustatyti taikytas sausasis metodas, naudojant analizatorių „Cilas 1090 LD“. Tyrimas atliktas 0,01–500 μm diapazone, kaip nešiklį naudojant orą. Dalelės ultragarsu disperguotos tol, kol pasiektas 12 % dalelių pasiskirstymas; matavimo trukmė – 60 s. Duomenims apdoroti ir įrangai valdyti naudota „Fraunhofer“ programinė įranga.

Medžiagų smulkumas nustatytas oro pralaidumo (Blaine'o) metodu pagal LST EN 196–6:2010 reikalavimus. Šio metodo esmė – medžiagos smulkumo išraiška per savitąjį paviršiaus plotą. Oro srauto intensyvumas ir jo pratekėjimo greitis priklauso nuo medžiagos porų dydžio, kuris tiesiogiai susijęs su tiriamosios medžiagos granulimetrine sudėtimi. Savitasis paviršius apskaičiuojamas nustatant laiką t , per kurį žinomas oro kiekis pereina per nustatyto poringumo medžiagos sluoksnį.

Stiklo apdirbimo atliekų pucolaniniam aktyvumui nustatyti taikytas Chapelle metodas pagal NF P18-513 standartą. Mišiniui ruošti naudota magnetinė maišyklė. Bandymui imta po 1 g stiklo apdirbimo atliekų ir CaO bei 250 g distiliuoto vandens. Komponentai supilti į kolbą ir, nuolat maišant, 16 valandų kaitinti 90 °C temperatūroje. Po kaitinimo bandinys atvėsintas iki kambario temperatūros ir sumaišytas su 250 ml sacharozės tirpalo. Mišinį filtravus, paimta 50 ml filtrato ir įlašinti 2–3 lašai fenolftaleino indikatoriaus (tirpalas nusidažo rausva spalva). Galiausiai tirpalas titruotas druskos rūgštimi (HCl), kol tapo bespalvis. Pagal sunaudotą HCl kiekį apskaičiuotas CaO kiekis, tenkantis vienam gramui pucolaninės medžiagos.

Termogravimetrinė ir diferencinė terminė analizė atlikta naudojant „Linseis STA PT-1600“ įrangą. Bandiniai (40–60 mg) kaitinti korundo tiglyuose iki 1000 °C temperatūros, kėlimo greitis – 10 °C/min.

Rentgeno struktūrinė analizė (RSA) atlikta rentgeno difraktometru „Bruker AXS D8 ADVANCE“. Naudoti šie rentgeno spindulių difrakcijos (XRD) parametrai: $\text{CuK}\alpha$ spinduliuotė, Ni filtras, 0,02° detektoriaus žingsnis, 0,5 s intensyvumo matavimo intervalas, anodo įtampa $U_a = 40\text{ kV}$ ir srovė $I = 40\text{ mA}$. Matavimų tikslumas siekė $2\theta = 0,01^\circ$.

Rentgeno fluorescencinė spektroskopija atlikta spektrometru „Bruker X-ray S8 Tiger WD“. Naudotas Rh rentgeno spindulių vamzdelis (anodo įtampa iki 60 kV, srovė I – iki 130 mA). Bandiniai tirti helio atmosferoje, taikant „SPECTRA Plus QUANT EXPRESS“ metodą. Analizei naudota „PDF-4+“ (2016 m.) kristalinių junginių duomenų bazė.

EDX tyrimas atliekamas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu, prieš tai bandinį kruopščiai išdžiovinus, nupoliravus ir padengus laidžiu anglies ar aukso sluoksniu.

Medžiagų mikrostruktūra tirta skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu (SEM), „JEOL JSM-7600F“. Tyrimo parametrai: 10 kV ir 20 kV įtampa, atstumas

iki bandinio paviršiaus – 7–10 mm. Mikrostruktūros ypatumai identifikuoti analizuojant bandinių skėlimo paviršių, vaizdą registruojant antrinių elektronų signalu. Didinimas siekė nuo 25 iki 100 000 kartų. Prieš tyrimą skėlimo paviršius vakuume padengtas plonu aukso sluoksniu, naudojant „QUORUM Q150R ES“ prietaisą. Taip pat naudotas skenuojantis elektroninis mikroskopas „Helios Nanolab 650“ (FEI). Šiuo atveju bandiniai magnetroniniu būdu padengti 10 nm Cr sluoksniu prietaise „Quorum Q150T ES“. Tyrimo parametrai: įtampa 5 kV, elektronų spindulio srovė 0,8 nA. Papildomai bandiniai fotografuoti skaitmeniniu fotoaparatu „Sony ILCE 5000“.

2.3.2. Cemento tešlos ir betono mišinių bandymų metodai

Cemento tešlų reologinėms savybėms nustatyti naudotas vibroviskozimetras „SV-10“. Tyrimams imta 45–50 ml paruoštos tešlos. Į indą įmerkiamos pastoviu dažniu virpančios plokštelės, kurios fiksuoja tešlos klampos pokytį pagal pasipriešinimo jėgą. Modifikuotų cemento tešlų parametrai matuoti pradiniam etape bei po 5, 10, 15, 20, 25, 30 ir 60 minučių. Vadovaujantis LST EN 1015-3:2002/A2:2007, nustatytas modifikuotų cemento tešlų pasklidimas.

Kietėjant betonui adiabatinėmis sąlygomis išsiskiriantis šilumos kiekis nustatytas pagal LST EN 12390-15 reikalavimus. Bandymas atliktas 20 ± 2 °C aplinkos temperatūroje. Tyrimai atlikti pusiau adiabatinėmis sąlygomis. Bandiniai buvo suformuojami į $100 \times 100 \times 100$ mm dydžio formas su termopora. Prieš maišant betoną, jo sudėtinės dalys ne mažiau kaip 24 valandas laikytos toje pačioje aplinkoje, kurioje ruošiamas mišinys; taip užtikrinama pradinė 20 ± 2 °C medžiagų temperatūra. Jei betono temperatūra skiriasi, ji privalo būti užfiksuota. Taip pat įvertinama naudojamos įrangos temperatūra. Maišymas vykdytas be delsos, o gautas mišinys supiltas į formas. Pradinė laiko žyma fiksuojama vandenį įpylus į mišinį. Prieš tyrimą nustatyta formos masė, kad būtų galima tiksliai apskaičiuoti bandiniui paimto betono masę. Užpildyta forma, suvibruojama ir dedama į metalinę dėžę suvidine 50 mm storio polistireninio putplasčio izoliacija – pageidautina, kad bandymas prasidėtų ne vėliau kaip per 30 min. nuo vandens įpylimo. Tyrimo metu temperatūra fiksuota ne ilgesniais kaip 5 min. intervalais. Bandymo trukmė siekė ne mažiau kaip 72 valandas; jis tęstas tol, kol betono išskiriama šiluma per parą tapo ne didesnė nei 1 °C.

Kitos betono savybės nustatytos pagal šiuos standartus: įtraukto oro kiekis – LST EN 12350-7, mišinio sutankinamumas – LST EN 12350-4, mišinio sklidumas – LST EN 12350-5.

2.3.3. Sukietėjusio betono savybių tyrimų metodai

Vandens įgeris nustatytas siekiant įvertinti bandinių poringumą. Betono bandiniai pirmiausia džiovinti krosnyje 100 ± 5 °C temperatūroje iki pastovios masės, tada natūraliai atvėsinti iki kambario temperatūros ir pasverti (w_1). Po to kubeliai 48 valandoms panardinti į 20 ± 2 °C temperatūros vandenį. Praėjus šiam laikui, bandiniai ištraukti, jų paviršius nušluostytas ir jie vėl pasverti (w_2). Galutiniam rezultatui nustatyti apskaičiuotas trijų bandinių svėrimo rezultatų vidurkis, o vandens įgeris apskaičiuotas pagal (2.1) formulę (Ma et al., 2023):

$$f = \frac{w_2 - w_1}{w_1}, \quad (2.1)$$

čia f – vandens įgeris (%), w_1 – išdžiovintų betono bandinių svoris (kg), w_2 – įmirkytų bandinių svoris (kg).

Vandens įgerio kinetikai įvertinti apskaičiuotas įgeriamumo indeksas. Betono bandiniai džiovinti krosnyje 100 ± 5 °C temperatūroje iki pastovios masės. Išdžiovinti ir iki kambario temperatūros atvėsinti bandiniai iš visų pusių padengti parafinu, paliekant atvirą tik apatinę plokštumą, kuri bus nardinama į vandenį. Paruošti bandiniai padėti ant dviejų skersinių vonelėje, kuri pripildyta vandens tiek, kad bandiniai būtų apsemti 5 mm. Visi bandiniai svėrti praėjus 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ir 1440 minučių nuo jų panardinimo. Įgeriamumo indeksas apskaičiuotas pagal (2.2) formulę (Mao et al., 2021):

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t}, \quad (2.2)$$

čia Q – įgerto vandens tūris (mm^3), A – paviršiaus plotas sąveikaujantis su vandeniu (mm^2), k – kapiliarinis įgėrimo koeficientas ($\text{mm/s}^{0.5}$), t – laikas (s).

Kitos betono savybės nustatytos vadovaujantis šiais galiojančiais standartais: sukietėjusio betono tankis – LST EN 12390-7:2019, gniuždomasis stipris – LST EN 12390-3:2019, betono atsparumas šalčiui tūrinio užšaldymo ir atšildymo metodu – LST 1428-17:2016, o atsparumas cikliškam užšalimui ir atitirpimui naudojant ledą tirpinančias druskas – CEN/TS 12390-9:2016. Sukietėjusio betono tankiui bei gniuždomajam stipriui nustatyti naudoti $150 \times 150 \times 150$ mm matmenų bandiniai. Lenkimo stiprio bandymams suformuotos $100 \times 100 \times 400$ mm sijos. Betono atsparumas šalčiui tūrinio užšaldymo ir atšildymo metodu nustatytas naudojant $100 \times 100 \times 100$ mm bandinius, kurie buvo bandomi po 200 ir 300 ciklų. Atsparumui cikliškam užšaldymui ir atitirpimui su ledą tirpinančiomis druskomis vertinti naudoti $150 \times 150 \times 150$ mm matmenų bandiniai, o jų masės nuostoliai nustatyti po 28 ir 56 ciklų.

Atlikus tūrinį šaldymą, vertintas bandinių vidinės struktūros pažeidimų laipsnis po skirtingo užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus. Pažeidimo laipsniui apskai-

čiuoti naudota (2.3) formulė (Wu et al., 2023). Pažaidos laipsniui įvertinti matuotas ultragarso impulso sklidimo greitis; šis rodiklis nustatytas visiems bandiniams, o galutiniam rezultatui apskaičiuotas trijų bandinių vidurkis.

$$D_n = 1 - \frac{V_n^2}{V_0^2}, \quad (2.3)$$

čia D_n – bandinių vidinių pažaidų laipsnis po tam tikro kiekio praėjusių užšaldymo ir atšildymo ciklų (%), V_n – bandinių ultragarso impulso sklidimo greitis po tam tikro kiekio praėjusių užšaldymo ir atšildymo ciklų (m/s), V_0 – bandinių ultragarso impulso sklidimo greitis prieš šalčio atsparumo bandymus (m/s).

Ultragarso impulso sklidimo laikas nustatytas prietaisu „Pundit 7“ (keitiklių dažnis – 54 kHz) ir apskaičiuotas ultragarso impulso sklidimo greitis (UIG, m/s) pagal formulę:

$$\text{UIG} = \frac{l}{\tau}, \quad (2.4)$$

čia l – bandinio ilgis, m; τ – signalo sklidimo laikas, s.

Bendras betono poringumas apskaičiuotas pagal formulę:

$$P_b = \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_s}\right), \quad (2.5)$$

čia P_b – bendrasis betono poringumas, %; ρ_c – betono tankis, kg/m^3 ; ρ_s – betono savitasis tankis, kg/m^3 .

Betono atvirasis (kapiliarinis) poringumas apskaičiuotas pagal formulę:

$$P_a = W_p \times \frac{\rho_c}{1000}, \quad (2.6)$$

čia P_a – atvirasis betono poringumas, %; W_p – pilnasis cementbetonio bandinių vandens įgėris, %; ρ_c – cementbetonio tankis, kg/m^3 .

Uždarasis poringumas apskaičiuotas pagal formulę:

$$P_u = P_b - P_a, \quad (2.7)$$

čia P_u – uždarasis poringumas, %; P_a – atvirasis poringumas, %; P_b – bendrasis poringumas, %.

Šarmų ir užpildų reakcijos (šarminės korozijos) tyrimai atlikti vadovaujantis RILEM AAR-4 standarto metodika. Betono prizmės, kurių matmenys $75 \times 75 \times 250$ mm, paruoštos naudojant bandomuosius užpildus ir kitas mišinio sudedamąsias dalis. Bandiniai ne mažiau kaip 20 savaičių laikyti karštoje (60°C) ir drėgnoje aplinkoje, kuri paspartina šarminę reakciją. Siekiant nustatyti betono plėtimąsi, matavimai atlikti reguliariai.

Prizmės gaminamos naudojant portlandcementį pagal tiriamą betono sudėtį, o bendras šarmų kiekis mišinyje padidinamas iki 5,5 kg natrio oksido ekvivalento

viename kubiniame metre betono. Jei natrio oksido kiekį reikia padidinti, į mišinį papildomai pridedama natrio hidroksido (NaOH).

Ilgio matavimo prietaisas su vertikaliai sumontuotu matuokliu turi atitikti etaloniškos smeigės formą prizmėje. Matuoklio skalės padalos turi būti ne didesnės nei 0,002 mm, o paklaida – ne didesnė nei 0,005 mm. Bandiniai talpinami į konteinerius, kurie dedami į kamerą, užtikrinant 60 ± 2 °C temperatūrą ir artimą 100 % santykinę oro drėgnį. Vandens lygis konteinerio apačioje siekia 35 ± 5 mm, o prizmės laikomos 15 mm aukštyje virš vandens paviršiaus. Kiekviename konteineryje talpinami trys bandiniai.

Atliekant periodinius matavimus, nustatomas prizmių ilgio ir svorio pokytis, palyginti pradinius duomenis (C_0 , W_0) su rezultatais po nustatyto laikotarpio (C_t , W_t). Ilgio pokytis (pailgėjimas) apskaičiuojamas pradinio ilgio procentine dalimi 0,001 % tikslumu, o svorio padidėjimas – pradinio svorio procentine dalimi 0,01 % tikslumu.

Procentinė prizmės ilgio pokyčio dalis (E_n) išreiškiama pagal (2.8) formulę:

$$E_n = \frac{c_n - c_0}{l} \times 100, \quad (2.8)$$

čia E_n – ilgio pokytis, %; C_n – lyginamasis matmuo n -ąją savaitę (mm); C_0 – pradinis lyginamasis prizmės matmuo (mm); l – pradinis tos prizmės ilgis (mm).

Svorio pokytis (X_n) išreiškiamas pagal formulę:

$$X_n = \frac{w_n - w_0}{w_0} \times 100, \quad (2.9)$$

čia X_n – svorio pokytis (%); w_n – lyginamasis svoris n -ąją savaitę (g); w_0 – pradinis lyginamasis prizmės svoris (g).

Kiekvieną kartą matuojant, apskaičiuojamas vidutinis trijų prizmių ilgio pokytis 0,005 % tikslumu ir vidutinis svorio pokytis 0,01 % tikslumu. Procentinė trijų bandomųjų prizmių vidutinio ilgio pokyčio dalis (mE_n) išreiškiama pagal formulę:

$$mE_n = \frac{E_{n/1} + E_{n/2} + E_{n/3}}{3} \quad (2.10)$$

čia mE_n – trijų bandomųjų prizmių vidutinis ilgio pokytis (%); $E_{n/1}$, $E_{n/2}$, $E_{n/3}$ – prizmių ilgio pokytis (%).

Rezultatams apskaičiuoti, pateikiami kiekvieno pailgėjimo duomenis, išreikšti procentine pradinio atitinkamos prizmės ilgio dalimi 0,001 % tikslumu, o svorio padidėjimo duomenis, išreikštus procentine pradinio atitinkamos prizmės svorio dalimi 0,01 % tikslumu. Jei svoris sumažėja (X_t), tai reiškia, kad sistemoje yra nepakankamai vandens. Esant vandens trūkumui, reaktyvieji mišiniai gali neišsiplėsti. Jei bendrasis svorio sumažėjimas užfiksuojamas paskutinį kartą matuojant prizmių ilgį, tų prizmių matmenis reikia atmesti. Matavimo duomenis taip pat reikia atmesti, jei bet kuriuo bandymo laikotarpio metu konteinerio apačioje

nebelieka vandens arba vandens kiekis konteinerio apačioje padidėjo tiek, kad jis pradėjo siekti prizmes, o šios pradėjo jį sugerti (tokiu atveju iš prizmių išplaunama daug šarmų).

2.3.4. Anglies dioksido emisijos vertinimo metodika

Taikant gyvavimo ciklo analizę, betono sukeliamas CO₂ emisijas populiariausia vertinti nagrinėjant produkcijos gamybos stadiją (Celik et al., 2015; Sabau et al., 2021), kuri apima žaliavų gavybos, transportavimo ir produkto gamybos emisijas. Tolesni etapai – statyba, priežiūra, eksploatavimas, griovimas ir perdirbimas – šiame tyrime nevertinami. Pagrindinis darbo objektas yra betono gamybos emisijų analizė, naudojant stiklo apdirbimo atliekas kaip cemento pakaitalą, ir jų įtaka mažinant neigiamą poveikį aplinkai.

Skaičiavimai atlikti nustatant emisijas 1m³ betono mišinio pagal turimas žaliavų visuotinio atšilimo potencialo (GWP) vertes. Vertinimas apėmė tik CO₂ emisijas, neįtraukiant kitų šiltnamio efektą sukeliančių dujų (pavyzdžiui, metano ar azoto oksido). Visos emisijos išreiškiamos anglies dioksido ekvivalentu (CO_{2eq}).

Žaliavų emisijų rodikliai imti iš jų aplinkosauginių produkto deklaracijų (EPD), kuriose nurodomos visuotinio atšilimo potencialo (GWP) vertės ir CO₂ emisijos. Skaičiuojant galutinį rodiklį, visų sudėtinių dalių emisijos sumuojamos. Transportavimo sukeliama tarša vertinta atsižvelgiant į gabenamą žaliavų kiekį, atstumą ir naudojamus degalus.

Transportavimo metu išmetamų teršalų kiekis nustatytas vadovaujantis standartu GB/T 51366-2019 („Pastatų anglies dioksido emisijos skaičiavimo standartas“), kurio priede pateikiamos specifinės emisijų vertės. Šiame vertinime daroma prielaida, kad visos žaliavos gabenamos dyzelinu varomomis transporto priemonėmis, kurių keliamoji galia – 18 tonų, o CO₂ emisijos rodiklis vienam kilometrui siekia 0,000129 kg CO₂/(kg·km).

Siekiant pateikti kuo tikslesnius duomenis, betono užpildų transportavimo atstumas skaičiuotas pagal vidutinį nuotolį nuo Vilniaus regione esančių karjerų iki miesto. Cemento tiekimo vidutinis atstumas nustatytas nuo Vilniuje esančio cemento terminalo iki betono mišinio gamyklų, o technologinių įmaišų vidutinis transportavimo atstumas – nuo gamintojo sandėlio Vilniuje.

Pažymėtina, kad tiksliai įvertinti šį rodiklį yra sudėtinga, o siekiant maksimalaus tikslumo, reikėtų analizuoti konkrečius karjerus bei jų atstumus iki konkrečių betono gamyklų.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Nustatytas vidutinis stiklo apdirbimo atliekų dalelių dydis (3,98 μm), kuris yra iki 3 kartų mažesnis nei cemento, ir aukštas pucolaninis aktyvumas (927 mg CaO/g) bei dominuojantis SiO_2 kiekis (69 %) pagrindžia šios medžiagos gebėjimą dalyvauti antrinėje hidratacijoje. Šios charakteristikos leidžia stiklo atliekas naudoti kaip aktyvų pucolaninį komponentą cementui pakeisti, sudarant prielaidas tolesniems tyrimams, siekiant sukurti tankią, šarminę korozijai ir šalčiui atsparią betono mikrostruktūrą.
2. Nustatytas betono šlamo dalelių vidutinis dydis (15,85 μm) ir pucolaninio aktyvumo trūkumas pagrindžia šios medžiagos taikymą ne kaip rišiklio, o kaip smulkaus aktyvaus užpildo. Sudėtyje identifikuoti mineralai – kalcitas (36 %), portlanditas (16 %) ir larnitas (10,7 %) – rodo liekamąjį cemento hidratacijos potencialą, kuris lemia eksperimentinės dalies logiką: tirti šlamo įtaką betono matricos tankinimui ir sinerginę sąveiką su kristalizuojančiu priedu, siekiant kompensuoti galimą neigiamą poveikį mechaniniam stipriui.
3. Betono savybių tyrimams parinkti standartizuoti metodai leidžia objektyviai įvertinti technologinių atliekų ir kristalizuojančio priedo poveikį mechaniniam stipriui bei ilgaamžiškumui, o taikyta gyvavimo ciklo analizė (LCA) „nuo žaliavų iki gamyklos vartų“ gali tiksliai įvertinti poveikį aplinkai. Šis kompleksinis vertinimas yra būtinas norint pagrįsti, kad 19 % mažesnė CO_2 emisija pasiekama nebloginant betono eksploatacinio atsparumo šalčiui ir šarminę korozijai.

3

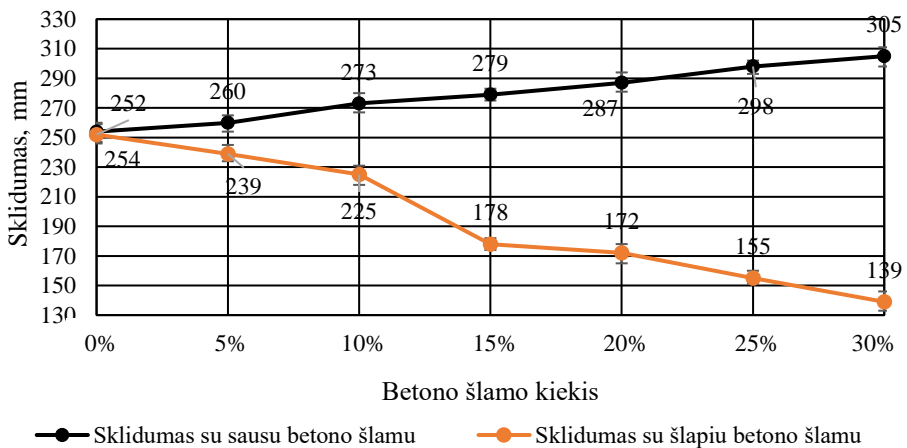
Betono, modifikuoto stiklo apdirbimo atliekomis ir betono šlamu su kristalizuojančiu priedu, savybių tyrimai

Šiame skyriuje yra pateikti betono šlamo, stiklo apdirbimo atliekos ir kristalizuojančio priedo poveikio cemento akmeniui, jo mikrostruktūrai, fizikinėms ir mechaninėms savybėms tyrimai. Ištirtas kompleksinis technologinių atliekų poveikis tvaraus betono fizikinėms, mechaninėms savybėms, atlikti betono atsparumo šalčiui ir šarminei korozijai tyrimai, įvertintas tvaraus betono poveikis aplinkai.

Skyriaus tematika kartu su bendraautoriais paskelbti 5 straipsniai (Nagrockiene et al. 2022, Pocius et al. 2023a, 2023b, 2024, 2025), tyrimų rezultatai buvo pristatyti 7 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

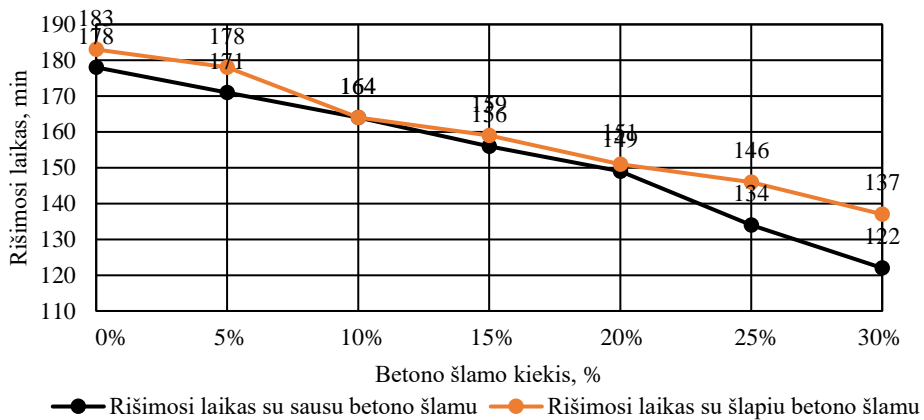
3.1. Betono šlamo poveikis cemento akmens savybėms

Cemento tešlos sklidumo tyrimai parodė, kad keičiant cementą sausu betono šlamu, tešlos sklidumas didėja. Gauti rezultatai pateikti 3.1 pav. Kuo daugiau cemento pakeista išdžiovintu betono šlamu, tuo didesnis buvo sklidumas. Pakeitus 30 % cemento sausu betono šlamu, sklidumas padidėjo 17 %, palyginti su kontroliniu bandiniu. Bandiniuose su skystu betono šlamu stebėta priešinga tendencija: kuo daugiau vandens buvo pakeista skystu betono šlamu, tuo mažesnis buvo sklidumas, nes didėjo kietosios fazės kiekis. Padidinus keičiamo vandens kiekį iki 60 %, sklidumas sumažėjo 82 %. Tai galėjo būti dėl fakto, kad efektyvus vandens kiekis bandiniuose sumažėjo. Apskaičiavus pagal šlamo tankį, bandinyje, kuriame 60 % švaraus vandens buvo pakeista skystu betono šlamu, efektyvus vandens kiekis yra 21,4 % mažesnis.



3.1 pav. Cemento tešlos sklidumo priklausomybė nuo betono šlamo kiekio
Fig. 3.1. Dependence of cement paste spreading on the amount of concrete sludge

Nustačius rišimosi trukmę bandiniuose su išdžiovintu ir šlapiu betono šlamu, pastebėta, kad ji mažėja didėjant šlamo kiekiui. Tyrimų rezultatai pateikti 3.2 pav. Rišimosi trukmės pokyčiai buvo labai panašūs, nesvarbu, ar naudotas išdžiovintas ar šlapias betono šlamas. Palyginti su kontrolinių bandinių rezultatais, rišimosi trukmė mišiniuose su sausu betono šlamu sumažėjo 56 minutėmis, o su skystu betono šlamu – 46 minutėmis. Tikėtina, kad tai gali būti dėl to, jog betono šlamo sudėtyje yra nemažas kiekis kalcito, kuris mažina rišimosi trukmę (Lothenbach et al., 2008).



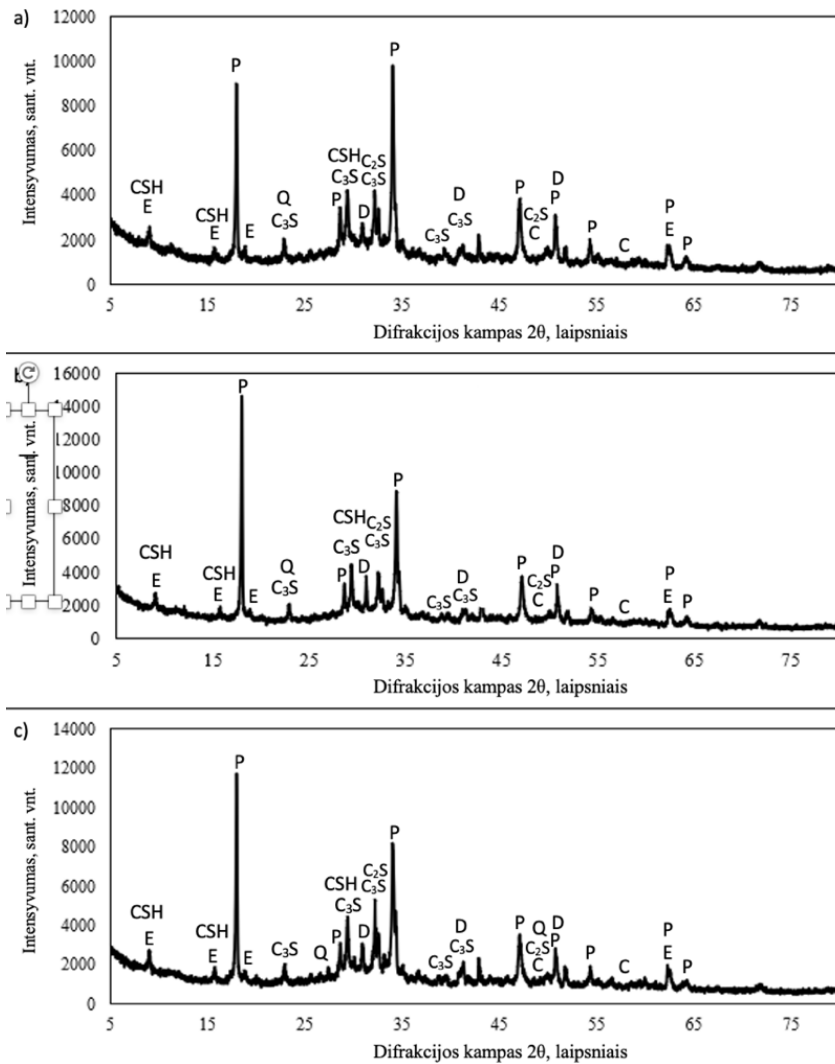
3.2 pav. Cemento tešlos rišimosi trukmės priklausomybė nuo betono šlamo kiekio
Fig. 3.2. Dependence of cement paste setting time on the amount of concrete sludge

Norint nustatyti cheminės sudėties skirtumus, atlikta XRD analizė, kurios metu palyginti sukietėjusio cemento akmenų bandiniai be betono šlamo ir su džiovintu bei šlapiu šlamu. Tirtos trys imčių grupės: be priedo, su 10 % džiovinto betono šlamo ir su 10 % šlapio betono šlamo. Tyrimai parodė, kad visuose bandiniuose aptikti portlanditas, kalkakmenis, dolomitas, etringitas ir C–S–H, tačiau šių fazių kiekiai skyrėsi. Rezultatai pateikti 3.3 pav.

Portlandito kiekis visuose bandiniuose, nepaisant skirtingo cemento kiekio, buvo panašus, tačiau stebima tendencija – jo kiekis didėja mišiniuose su betono šlamu ir svyruoja apie 41–45 %. Tai gali reikšti, kad betono šlamos papildomai prisideda prie portlandito kiekio bandiniuose.

Kalcito kiekiai skirtinguose bandiniuose yra panašūs: su džiovintu betono šlamu – 20,3 %, su šlapiu betono šlamu – 18,1 %, kontrolinei imčiai – 23,0 %. Tai rodo, kad bandinyje su šlapiu betono šlamu daugiau kalcio jonų dalyvauja hidratacijos produktų kristalizacijoje. Buvo nustatyti skirtingi C₃S ir C₂S kiekiai: be betono šlamo – 15,4 %, su džiovintu betono šlamu – 9,5 %, su šlapiu betono šlamu – 5,6 %. C₂S ir C₃S kiekio sumažėjimas siejamas su sumažėjusiu cemento kiekiu mišiniuose su šlamu. Tačiau bandinyje su šlapiu betono šlamu C₂S ir C₃S kiekiai yra maždaug 1,7 karto mažesni nei bandinyje su sausu betono šlamu, kas rodo, jog cemento mineralų hidratacija esant šlapiam betono šlamui vyksta aktyviau.

Etringito kiekiai taip pat skiriasi. Etringito ir C–S–H tipo mineralų kiekiai bandiniuose su betono šlamu yra tokie: su džiovintu betono šlamu – 2,7 %, su šlapiu betono šlamu – 5,9 %, kontroliniame bandinyje – 3,2 %. Tai gali reikšti, kad šlapias betono šlamos skatina C–S–H tipo mineralų kristalizaciją.

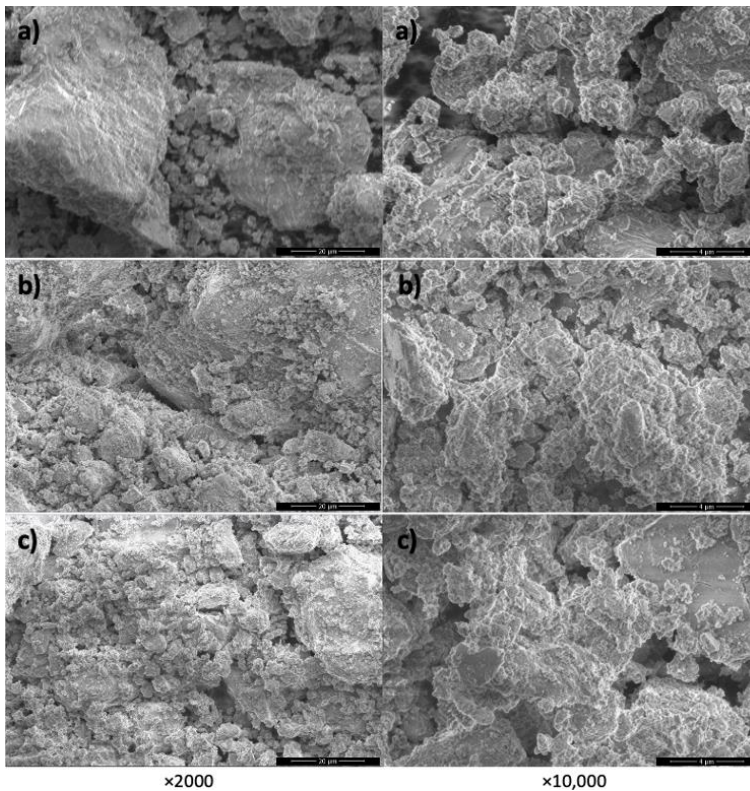


3.3 pav. Sukietėjusio cemento akmens rentgenogramos: a) be betono šlamo, b) su 10 % pakeisto cemento su sausu betono šlamu, c) su 10 % pakeisto cemento su šlapiu betono šlamu; C – kalcitas, P – portlanditas, D – dolomitas, E – etringitas, C₃S – trikalcio silikatas, C₂S – dikalcio silikatas, CSH – kalcio silikato hidratas, Q – kvarcas

Fig. 3.3. XRD image of hardened cement paste: a) without sludge, b) with 10 % cement replacement with dry concrete sludge, c) with 10 % cement replacement with wet concrete sludge; C – calcite, P – portlandite, D – dolomite, E – ettringite, C₃S – tricalcium silicate, C₂S – dicalcium silicate, CSH – calcium silicate hydrate, Q – quartz

Drėgnos sąlygos nedžioviname betono šlame skatina aktyvesnę cemento mineralų hidrataciją; tai gali būti susiję su specifine vandens plėvele, dengiančia šlamo daleles. Kontroliniame bandinyje kvarcas neaptiktas, o bandiniuose su šlamu nustatytas tam tikras kvarco kiekis. Dolomitas randamas visuose trijuose bandiniuose, tačiau bandiniuose su šlamu dolomito kiekis yra maždaug tris kartus didesnis nei kontroliniame bandinyje.

3.4 pav. pateikiami bandinių mikrostruktūros vaizdai skirtingais didinimais. Akivaizdu, kad betono šlamo (šlapio arba džiovinto) priedas tankina mikrostruktūrą, tikėtina dėl didesnio hidracijos produktų kiekio.

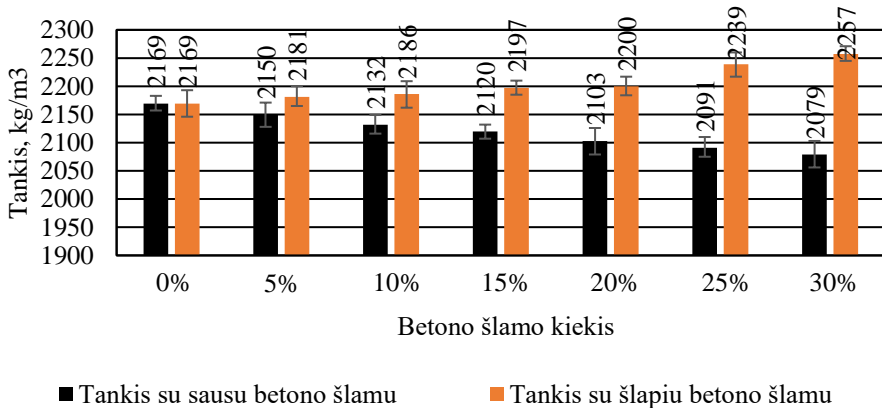


3.4 pav. Cemento akmens SEM: a) be betono šlamo, b) su 10 % pakeisto cemento sausu betono šlamu, c) su 10 % pakeisto cemento cemento su šlapiu betono šlamu

Fig. 3.4. SEM images of cement stone: a) with no concrete sludge, b) with 10 % cement replacement with dry concrete sludge, c) with 10% cement replacement with wet concrete sludge

Ištyrus gautų bandinių tankius nustatyta, kad tankio reikšmės kinta priklausomai nuo betono šlamo fizinio būvio. Gauti rezultatai pateikti 3.5 pav. Didinant

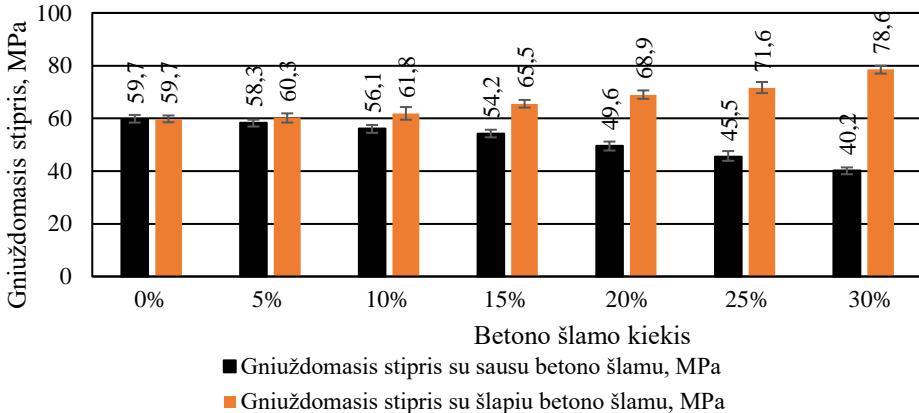
pakeičiamo cemento kiekį sausu betono šlamu, bandinių tankis tolygiai mažėja, o didinant keičiamo vandens kiekį skystu betono šlamu tankis didėja. Sauso betono šlamo piltinis tankis yra mažesnis už cemento piltinį tankį, tad, keičiant cementą sausu šlamu, cemento akmens tankis gali mažėti. Pakeitus 30 % cemento sausu betono šlamu, tankis sumažėjo 90 kg/m^3 , palyginti su kontroliniu bandiniu, o pakeitus 60 % švaraus vandens skystu betono šlamu, tankis padidėjo 79 kg/m^3 . Bandiniuose su šlapiu betono šlamu tankis gali didėti dėl kietosios fazės kiekio padidėjimo.



3.5 pav. Cemento akmens tankio priklausomybė nuo betono šlamo kiekio
Fig. 3.5. Dependence of cement stone density on the amount of concrete sludge

Atlikus suformuotų bandinių gniuždomojo stiprio bandymus, nustatytos priešingos fizikinių-mechaninių savybių kitimo tendencijos, priklausomai nuo betono šlamo agregatinės būsenos. Bandymų rezultatai yra pateikti 3.6 pav. Nustatyta, kad didinant pakeičiamo cemento kiekį sausu betono šlamu, bandinių gniuždomasis stipris po 28 parų kietėjimo nuosekliai mažėjo. Cemento kiekį pakeitus iki 10 % sausu šlamu, fiksuotas nežymus 3,6 MPa stiprio sumažėjimas, palyginti su kontroliniu bandiniu. Esant 30 % pakaitai, stiprio kritimas siekė 19,5 MPa. Priešinga tendencija stebėta mišiniuose naudojant skystą betono šlamą: dalinis vandens pakeitimas šiuo šlamu turėjo teigiamos įtakos gniuždomojo stiprio augimui. Pakeitus 60 % užmaišymo vandens skystu betono šlamu, gniuždomasis stipris padidėjo 19,7 MPa, palyginti su etaloniniu bandiniu, o tai leidžia daryti prielaidą apie aktyvų skystosios fazės dalyvavimą hidratacijos procesuose. Tikėtina, kad gniuždomojo stiprio mažėjimą naudojant sausą betono šlamą galimai lėmė sumažėjęs cemento kiekis bei šlamo dalelių inertiškumas. Skysto šlamo teigiama įtaka

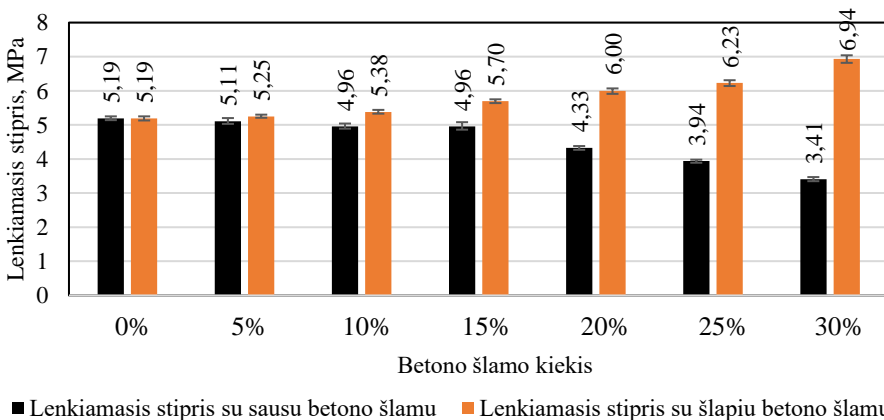
stipriui galimai gali būti siejama su mikroužpildo efektu bei skystoje terpėje esančių dalelių gebėjimu veikti kaip kristalizacijos centrai, skatinantys tankesnės cemento akmens struktūros formavimąsi.



3.6 pav. Gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo betono šlamo kiekio ir būsenos

Fig. 3.6. Dependence of compressive strength on the amount and state of concrete sludge

Gavus lenkiamąjį stiprį rezultatus (3.7 pav.), matoma tokia pati tendencija kaip ir gniuždomojo stiprio atveju. Pakeitus 30 % cemento sausu betono šlamu, lenkimo stipris sumažėjo 34 %, palyginti su kontroliniu bandiniu, o pakeitus iki 10 % – sumažėjo 2 %. Keičiant švarų vandenį skystu betono šlamu, lenkiamasis stipris didėja; pakeitus 60 % švaraus vandens, lenkimo stipris padidėjo 33 %.

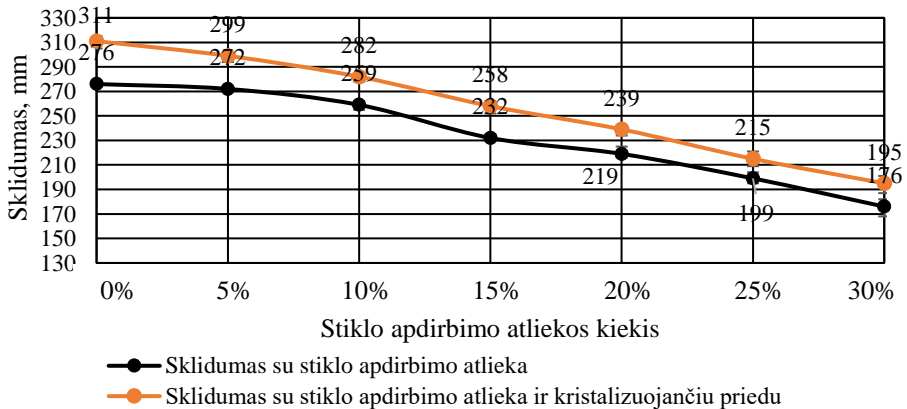


3.7 pav. Lenkiamąjį stiprį priklausomybė nuo betono šlamo kiekio ir jo būsenos
Fig. 3.7. Dependence of bending strength on the amount of concrete sludge and its state

Tiek gniuždomasis, tiek lenkiamasis stipris bandiniuose, kuriuose naudotas sausas betono šlamas, reikšmingai mažėjo – tai galėjo būti dėl skiedimo efekto (Camiletti et al., 2013). Bandiniuose su skystu betono šlamu gniuždomasis ir lenkiamasis stipriai padidėjo dėl mažesnio efektyvaus vandens kiekio, todėl faktinis V/C santykis buvo mažesnis. Taip pat tai gali būti susiję su smulkiosios fazės kiekio padidėjimu mišiniuose.

3.2. Stiklo apdirbimo atliekos poveikis cemento tešlos ir cemento akmens savybėms

Atlikus cemento tešlos sklidumo bandymus nustatyta, kad keičiant cementą stiklo apdirbimo atliekomis, sklidumas mažėja. Bandymų rezultatai pateikti 3.8 pav.



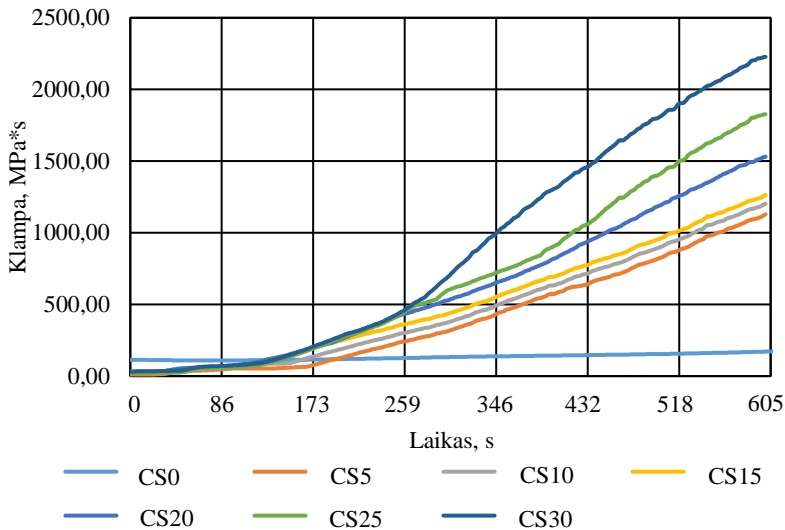
3.8 pav. Cemento tešlos sklidumo priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio

Fig. 3.8. Dependence of cement paste spreading on the amount of glass processing waste

Kuo daugiau cemento pakeičiama stiklo apdirbimo atliekomis, sklidumas mažėja. Bandinių, kurių sudėtyje buvo 30 % stiklo apdirbimo atliekų, sklidumas sumažėjo 36 %, palyginti su kontroliniu bandiniu. Tokius rezultatus lemia tai, kad stiklo apdirbimo atliekų dalelės yra smulkesnės už cemento daleles, todėl reikia daugiau superplastiklių arba vandens, kad būtų pasiektas toks pats sklidumo lygis. Pridėjus kristalizuojančio priedo, pastebima tokia pati tendencija – kuo daugiau stiklo apdirbimo atliekų mišinyje, tuo mažesnis sklidumas.

Taip pat buvo nustatoma klampa ir tendencijos, kaip stiklo apdirbimo atliekos veikia šviežios cemento tešlos klampą. Rezultatai pateikti 3.9 pav. Iš rezultatų

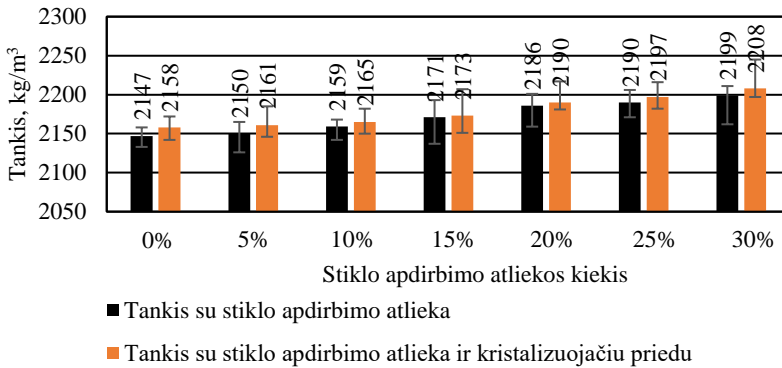
matyti, kad kuo daugiau cemento pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, tuo didesnė bandinių klampa. Sumaišius mišinius, iš pradžių jų klampumas yra panašus, tačiau bandymo metu mišiniuose su stiklo apdirbimo atliekomis jis po pusantros minutės pradeda sparčiai didėti. Kontrolinio bandinio klampa praktiškai nepakinta per visą bandymo laiką. Bandinio, kuriame buvo 30 % stiklo apdirbimo atliekų, mišinys po 10 min. labai suklampėja. Iš rezultatų matyti, kad stiklo apdirbimo atliekos maždaug nuo pusantros minutės nuo bandymo pradžios intensyviau reaguoja su vandeniu, keičiasi laisvojo vandens kiekis mišinyje ir dėl to didėja klampa (Diedrich et al. 2012).



3.9 pav. Cemento tešlos klamos priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio

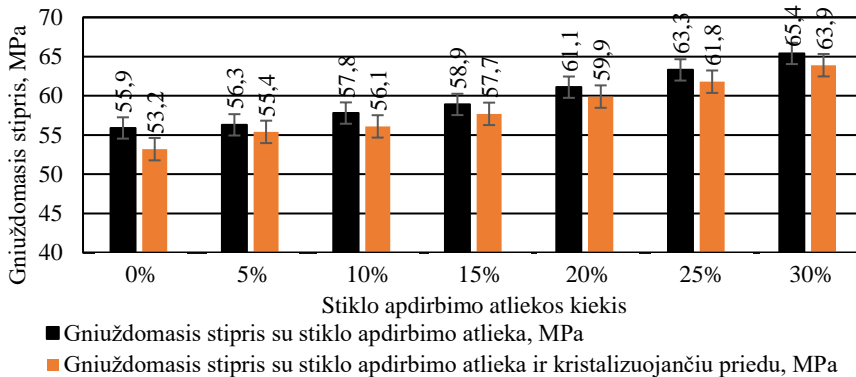
Fig. 3.9. Dependence of cement paste viscosity on the amount of glass processing waste

Nustčius skirtingų bandinių tankius, rezultatai pateikti 3.10 pav. Jie rodo, kad didinant stiklo apdirbimo atliekų kiekį mišiniuose, tankis didėja. Kuo daugiau cemento buvo pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, tuo tankesnė gaunama struktūra. Pakeitus 30 % cemento stiklo apdirbimo atliekomis, tankis padidėjo 52 kg/m^3 , palyginti su kontroliniu bandiniu. Bandiniuose, kuriuose papildomai naudotas kristalizuojantis priedas, tankis buvo didesnis nei bandiniuose, kuriuose naudotos tik stiklo apdirbimo atliekos. Didėjant stiklo apdirbimo atliekų kiekiui, nustatytas tankio augimas.



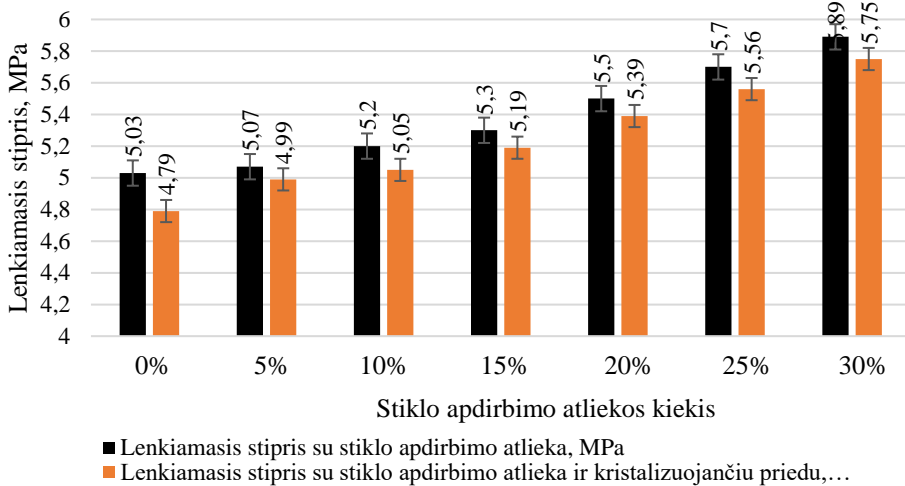
3.10 pav. Cemento akmens tankio priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio
Fig. 3.10. Dependence of cement stone density on the amount of glass processing waste

Po gniuždomojo stiprio nustatymo gauti rezultatai rodo, kad stiklo apdirbimo atliekos didina bandinių mechaninį atsparumą (3.11 pav.).



3.11 pav. Gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio
Fig. 3.11. Dependence of compressive strength on the amount of glass processing waste

Matyti, kad kuo daugiau mišiniuose naudojama stiklo apdirbimo atliekų, tuo didesnis gniuždomasis stipris. Palyginti su kontroliniais bandiniais, bandiniuose, kuriuose 30 % cemento buvo pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, nustatytas beveik 17 % stiprio prieaugis. Bandinių su kristalizuojančiu priedu stiprio didėjimas buvo mažesnis, palyginti su kontroliniais bandiniais. Tikėtina, kad tai lemia kristalizuojančio priedo gebėjimas sulėtinti stiprio augimą (Pazderka et al., 2016).



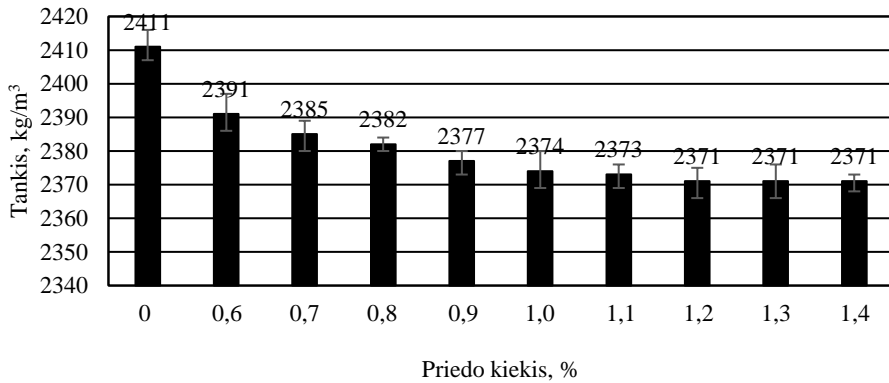
3.12 pav. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio

Fig. 3.12. Dependence of bending strength on the amount of glass processing waste

Ta pati tendencija stebima ir lenkiamojo stiprio rezultatuose (3.12 pav.). Kuo daugiau mišiniuose dedama stiklo apdirbimo atliekų, tuo didesnis lenkimo stipris. Bandiniuose, kuriuose 30 % cemento buvo pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, lenkimo stipris padidėjo 12 %, palyginti su kontroliniu bandiniu. Taip pat, kaip ir gniuždomojo stiprio atveju, lenkimo stipris mišiniuose su kristalizuojančiu priedu buvo nežymiai mažesnis.

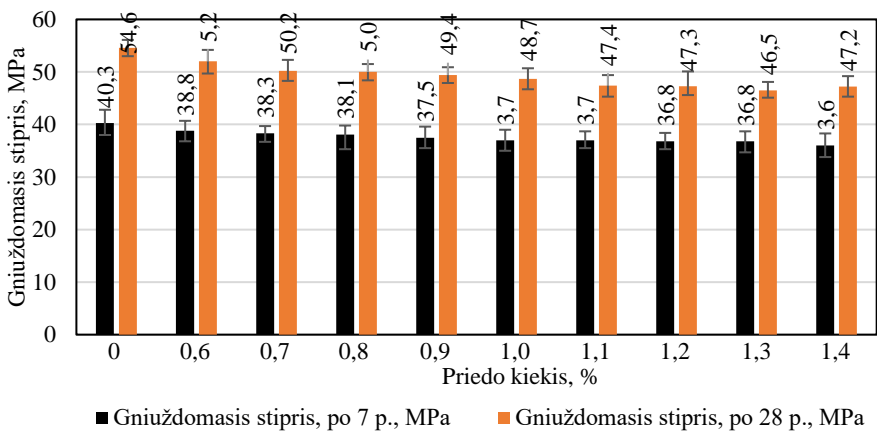
3.3. Kristalizuojančio priedo poveikis betono savybėms

Atlikus betono tankio tyrimus, pateiktus 3.13 pav., nustatyta, kad didinant kristalizuojančio priedo kiekį iki 1,4 %, betono tankis mažėja, palyginti su kontroliniu bandiniu. Naudojant mažiausią priedo kiekį (0,6 %), tankis sumažėjo 0,8 %, o didžiausią (1,4 %) – 1,7 %. Nustatyta, kad kristalizuojančio priedo poveikis betono tankiui yra labai nežymus.



3.13 pav. Betono tankio priklausomybė nuo kristalizuojančio priedo kiekio
Fig. 3.13. Dependence of concrete density on the amount of crystallising additive

Betono bandinių gniuždomasis stipris po 7 ir 28 kietėjimo parų, didinant kristalizuojančio priedo kiekį, mažėja. Gauti rezultatai pateikti 3.14 pav. Kontrolinių bandinių, kuriuose nebuvo priedo, vidutinis gniuždomasis stipris po 7 kietėjimo parų yra 40,3 MPa, o įdėjus 1,4 % kristalizuojančio priedo nuo cemento masės, stipris sumažėjo iki 36,0 MPa.



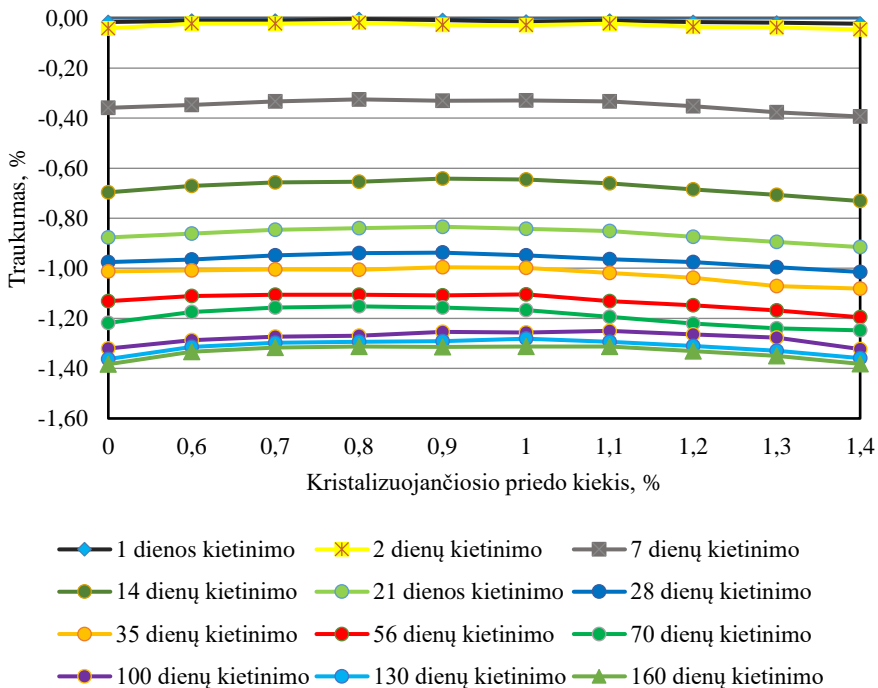
3.14 pav. Gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kristalizuojančio priedo kiekio po 7 ir 28 parų

Fig. 3.14. Dependence of compressive strength on the amount of crystallising additive after 7 and 28 days

Kontrolinių betono bandinių, kuriuose nebuvo priedo, vidutinis gniuždomasis stipris po 28 parų kietėjimo yra 54,6 MPa, o įdėjus 1,4 % kristalizuojančio priedo nuo cemento masės, stipris sumažėjo apie 13,5 %, palyginti su kontroliniu bandiniu. Atlikus tyrimus nustatyta, kad didinant kristalizuojančio priedo kiekį, gniuždomasis stipris po 7 ir 28 kietėjimo parų nežymiai mažėja.

Atlikus traukumo bandymus (3.15 pav.), pastebėta, kad traukumas mažėja didinant kristalizuojančio priedo kiekį, palyginti su kontroliniu bandiniu. Didžiausias traukumo sumažėjimas įvyksta, kai priedo kiekis yra 1,0 % nuo cemento masės – traukumas sumažėjo apie 1,8 %, palyginti su kontrole. Naudojant 1,2 % ir daugiau kristalizuojančio priedo, pastebėtas didesnis džiūvimo traukumas nei kontroliniame bandinyje.

Analizuojant betono mišinio traukumo priklausomybę nuo laiko, matyti, kad ankstyvasis traukumas vyksta gerokai sparčiau nei vėlesnysis / ilgalaikis. Toks reiškinys siejamas su greitesniu laisvojo vandens netekimu. Vėlesniuose betono kietėjimo etapuose traukumo augimas lėtėja, atitinkamai vykstant kitiems cemento hidratacijos etapams.



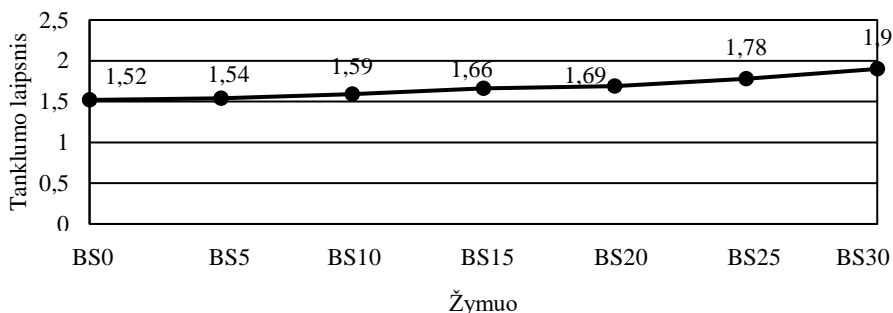
3.15 pav. Traukumo priklausomybė nuo kristalizuojančio priedo kiekio
Fig. 3.15. Dependence of shrinkage on the amount of crystallising additive

3.4. Stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo poveikis tvaraus betono savybėms

Norint sukurti ilgaamžį ir tvarų betoną, kuriame būtų naudojamos stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamos, būtina įvertinti šių atliekų poveikį pagrindinėms fizikinėms bei mechaninėms savybėms ir tokio betono ilgaamžiškumui.

3.4.1. Stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo poveikis betono mišinio savybėms

Betono mišiniui nustatytas konsistencijos rodiklis – tanklumo laipsnis. Bandymų rezultatai pateikti 3.16 pav. Iš rezultatų matyti, kad stiklo apdirbimo atliekos šiek tiek didina tanklumo laipsnį. Šis laipsnis didėja proporcingai atliekų kiekiui mišinyje. Palyginti su kontroliniu bandiniu, mėginio, kuriame buvo 30 % stiklo apdirbimo atliekų, tanklumo laipsnis buvo 25 % didesnis. Tai gali būti dėl itin smulkių stiklo dalelių, kurios sugeria daugiau vandens nei įprastinės medžiagos (Prathebas et al., 2018).

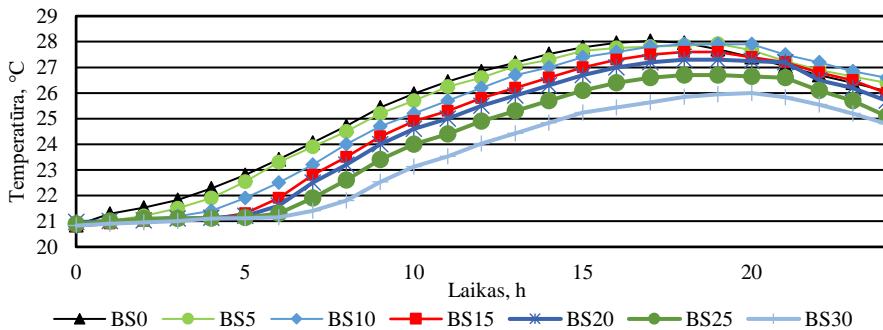


3.16 pav. Betono tanklumo laipsnio priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio

Fig. 3.16. Dependence of concrete degree of compactibility on the amount of glass processing waste

Betono mišinių kietėjimo metu vyksta hidratacijos reakcija, kurios metu išsiskiria šiluma. Šiame tyrime atlikti hidratacijos šilumos bandymai, siekiant įvertinti stiklo apdirbimo atliekų įtaką išsiskiriančios šilumos kiekiui. Rezultatai pateikti 3.17 pav. Iš gautų duomenų matyti, kad aukščiausia temperatūra pasiekta kontroliniame mišinyje – 28,03 °C. Keičiant cementą stiklo apdirbimo atliekomis, mišinio temperatūros bandymo metu buvo mažesnės ir toliau mažėjo didėjant stiklo atliekų kiekiui. Mažiausias išsiskyrusios hidratacijos šilumos kiekis buvo bandinyje, kuriame 30 % cemento pakeista stiklo apdirbimo atliekomis; didžiau-

sia temperatūros vertė šiame mišinyje buvo 26 °C. Taip pat matyti, kad pradiniam etape hidratacijos šiluma pradeda didėti lėčiau, kuo daugiau stiklo apdirbimo atliekų naudojama, o temperatūros maksimumai pasiekiami vėliau: kontroliniame mišinyje – po 17 val., o bandinyje su 30 % atliekų – po 20 val. Tokius rezultatus galėjo lemti sumažėjęs cemento kiekis mišiniuose, dėl ko mažėja trikalčio silikato kiekis ir išsiskiriančios šilumos tūris. Be to, stiklo apdirbimo atliekos gali lėtinti cemento rišimosi laiką ir taip prailginti betono mišinio apdorojimo laiką.

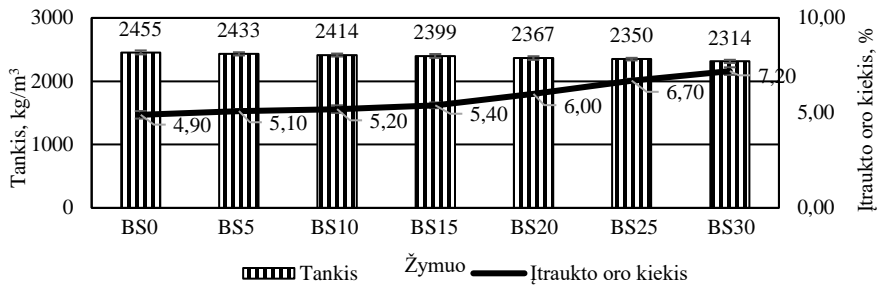


3.17 pav. Egzoterminės temperatūros priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio
Fig. 3.17. Dependence of exothermic temperature on the amount of glass processing waste

Norint išsiaiškinti stiklo apdirbimo atliekų įtaką įtrauktam oro kiekiui betono mišinyje, nustatytas įtraukto oro kiekis. Gauti rezultatai pateikti 3.18 pav.

Didinant stiklo apdirbimo atliekų kiekį mišiniuose iki 15 %, nustatytas nežymus įtraukto oro kiekio didėjimas. Pakeitus 15 % cemento stiklo apdirbimo atliekomis, įtraukto oro kiekis padidėjo 10 %, palyginti su kontroliniu bandiniu. Didinant stiklo apdirbimo atliekų kiekį mišiniuose, oro kiekis pradeda augti sparčiau: mišinyje, kuriame panaudota 30 % atliekų, įtraukto oro kiekis padidėjo apie 47 %, palyginti su kontroliniu bandiniu. Oro kiekio didėjimą lemia tai, kad ant stiklo dalelių paviršiaus oras ilgiau užsilaiko ir nepasišalina iš mišinio (Tan et al., 2013). Papildomai tai gali būti susiję su kalcito sluoksniu ant stiklo dalelių – smulkios netaisyklingos kalcito dalelės labiau sulaiko oro burbuliukus.

Nustatytas ir sukietėjusio betono bandinių tankis (3.18 pav.). Tankio pokyčiai koreliuoja su įtraukto oro kiekiu. Didėjant stiklo apdirbimo atliekų kiekiui (kurių tankis yra mažesnis už cemento), bandinių tankis mažėja. Taip pat tankį mažina didesnis įtraukto oro kiekis. Keičiant iki 15 % cemento stiklo apdirbimo atliekomis, tankis mažėja nežymiai; palyginti su kontroliniu bandiniu, tankis sumažėjo 56 kg/m³. Bandinyje su 30 % stiklo apdirbimo atliekų tankis sumažėjo 141 kg/m³.

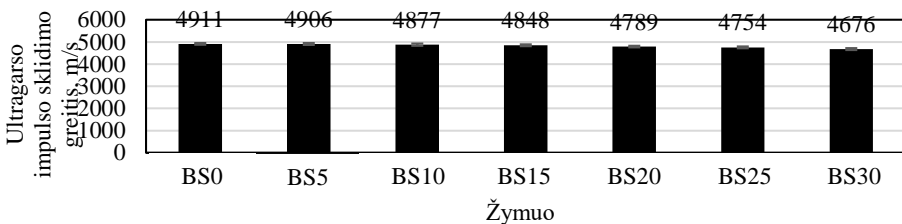


3.18 pav. Betono tankio ir įtraukto oro kiekio priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekos kiekio

Fig. 3.18. Dependence of concrete density and air entrainment on the amount of glass processing waste

3.4.2. Stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo poveikis sukietėjusio betono savybėms

Ultragarso impulso sklidimo greičio bandymai atlikti sukietėjusiems bandiniams po 28 parų kietėjimo (3.19 pav.). Gauti duomenys patvirtina tankio rezultatus: didinant stiklo apdirbimo atliekų kiekį mišiniuose, ultragarso impulso sklidimo greitis mažėja. Bandiniuose su stiklo apdirbimo atliekomis impulso sklidimo greitis yra žemesnis, nes šie bandiniai turi mažesnę tankį. Mažiausias impulso sklidimo greitis gautas bandiniuose, kuriuose 30 % cemento buvo pakeista stiklo apdirbimo atliekomis – jis buvo 235 m/s mažesnis nei kontroliniame bandinyje.

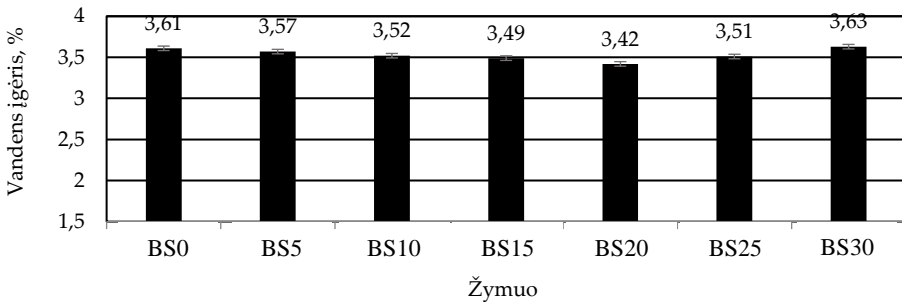


3.19 pav. Betono ultragarso impulso sklidimo greičio priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio

Fig. 3.19. Dependence of the ultrasonic pulse propagation velocity in concrete on the amount of glass processing waste

Vandens įgėris – svarbi betono savybė, daranti įtaką ilgaamžiškumui, todėl šiame tyrime nustatytas vandens įgėris. Gauti rezultatai pateikti 3.20 pav. Vandens įgėrio reikšmės svyruoja nuo 2,63 % iki 2,42 %. Mažiausias įgėris pastebėtas

bandinyje, kuriame 20 % cemento buvo pakeista stiklo apdirbimo atliekomis; šio bandinio įgėris buvo 7,3 % mažesnis nei kontrolinio bandinio.

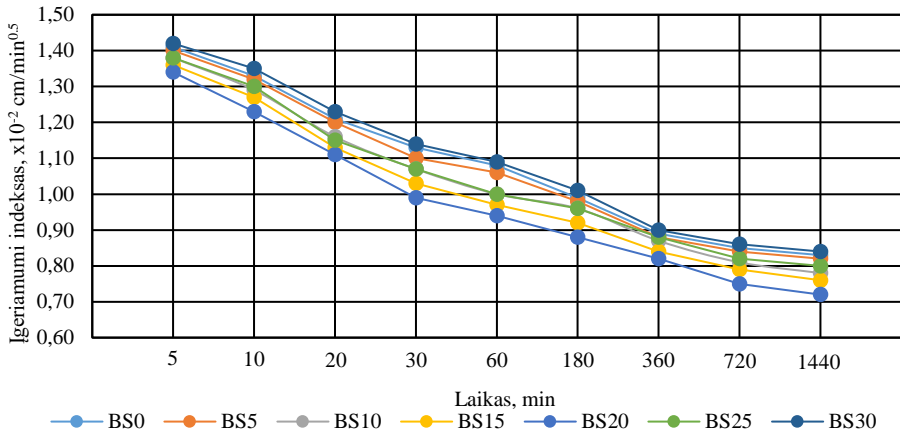


3.20 pav. Betono vandens įgėrio priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio
Fig. 3.20. Dependence of concrete water absorption on the amount of glass processing waste

Matoma tendencija: didinant stiklo apdirbimo atliekų kiekį iki 20 %, vandens įgėris mažėja, o didinant pakeitimą daugiau nei 20 % – pradeda didėti. Spėjama, kad iki 20 % sumažėjimas vyksta dėl mažesnio atvirųjų porų kiekio, susidarancio kristalizuojančio priedo ir stiklo atliekų sinergijos veikiant mišiniui. Manoma, kad kristalizuojantis priedas, sąveikaudamas su stiklo dalelių paviršiaus karbonatais, skatina papildomų hidratacijos produktų susidarymą ir porų užsigydymą, dėl to didėja uždarytųjų porų dalis. Pakeitus daugiau nei 20 % cemento, įgėris palaipsniui didėja – tikėtina, kad dėl padidėjusio įtraukto oro kiekio kristalizuojantis priedas nebegali užtikrinti pakankamo uždarytųjų porų susidarymo. Kitas veiksnys – didesnis stiklo apdirbimo atliekų pucolaniškumas: vykstant hidratacijai susidaro nauji produktai, užpildantys poras, kas taip pat gali mažinti įgėrį. Panašias tendencijas aprašė Nagrockienė et al. (2023).

Palyginimui, bandinyje su 30 % stiklo apdirbimo atliekų vandens įgėris buvo šiek tiek didesnis nei kontroliniame mėginyje be atliekų.

Kaip ir kitos tipinės poringos medžiagos, betonas turi vidinę struktūrą, kurią charakterizuoja sudėtingas porų tinklas. Šios poros atlieka svarbų vaidmenį užšalimo-atšilimo ciklų atsparume, nes jos palengvina vandens transportavimą užšalimo metu ir tuo pačiu palaiko termodinaminę bei slėgio pusiausvyrą betono struktūroje. Nors didelis vandens sugėrimas gali sumažinti atsparumą šalčiui, vidaus porų tinklo pralaidumo sumažinimas gali padėti sumažinti vandens įgeriamumą (Mohammed et al., 2014). Įgeriamumo indekso rezultatai pateikti 3.21 pav.



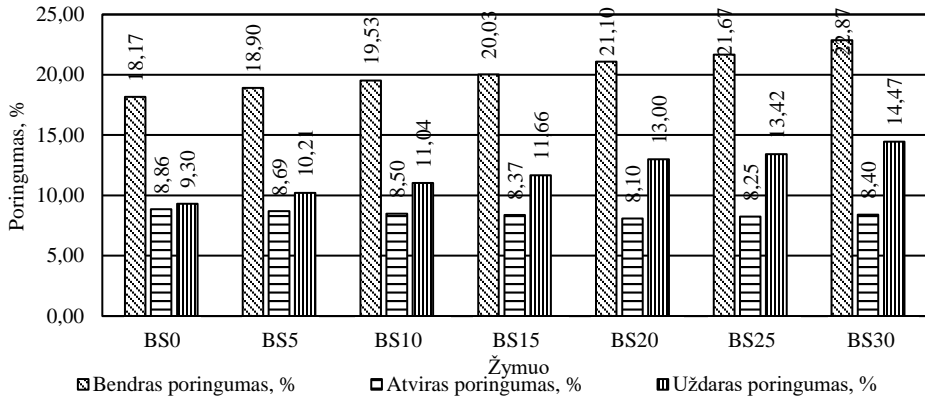
3.21 pav. Betono bandinių vandens įgeriamumo indekso priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekos kiekio

Fig. 3.21. Dependence of the water absorption index of concrete specimens on the amount of glass processing waste

Tyrimo duomenys rodo, kad įgeriamumo indeksas sumažėja, kai iki 20 % cemento pakeičiama stiklo apdirbimo atliekomis. Tačiau viršijus 20 % pakeitimą, įgeriamumo indeksas pradeda didėti ir priartėja prie kontrolinio bandinio rezultato. Įgeriamumo indekso sumažėjimas gali būti susijęs su tuo, kad vandeniui sunkiau įsiskverbti per vidinę porų struktūrą ir uždariusias poras, ypač kai smulkios stiklo dalelės užpildo atvirąsias poras betone (Pham et al., 2018), kas gali turėti įtakos porų struktūros modifikacijai. Bandinyje, kuriame 20 % cemento buvo pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, įgeriamumo indeksas po 1 440 minučių (24 val.) buvo $0,72 \times 10^{-2} \text{ cm/min}^{0,5}$, t. y. 13 % mažesnis nei kontroliniame bandinyje. Šie mažesni rezultatai greičiausiai susiję su tankesnės betono struktūros susidarymu, kai stiklo dalelės užpildo tuštumas ir reaguoja su kristalizuojančiu priedu. Toks sinerginis efektas didina uždarytųjų porų kiekį vidinėje porų struktūroje, veda prie rafinuotesnės mikrostruktūros ir geresnio atsparumo vandens pralaidumui (Harbec et al., 2017).

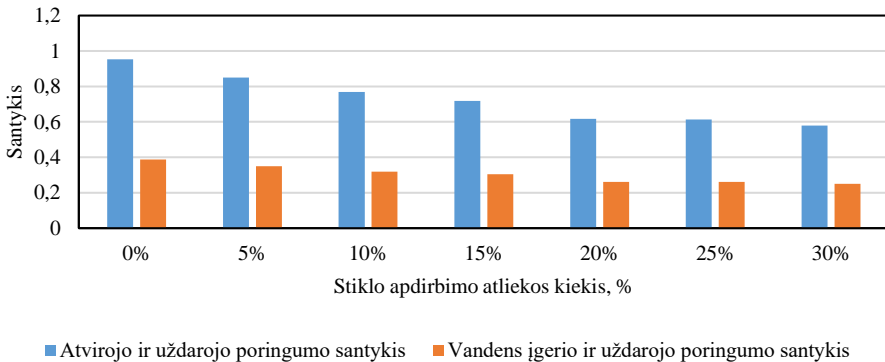
Siekiant patvirtinti aukščiau minėtas prielaidas, sukietėjusiems bandiniams nustatyti poringumo parametrai. Gauti rezultatai pateikti 3.22 pav. Didėjant stiklo apdirbimo atliekų proporcijai, keičiant cementą, tiek bendrasis, tiek uždariusis poringumas didėja, o atvirasis poringumas mažėja iki 20 % cemento pakeitimo stiklo apdirbimo atliekomis; viršijus šią ribą, jis pradeda didėti. Kai mišinyje naudojama 20 % stiklo apdirbimo atliekų, uždariusis poringumas padidėjo maždaug 55 %, bendras poringumas – beveik 26 %, o atvirasis poringumas sumažėjo 8,5 %, palyginti su kontroliniais bandiniais. Bendrojo poringumo ir atvirojo poringumo padidėjimą galima priskirti didesniam oro kiekio įtraukimui. Tačiau atvirųjų porų

sumažėjimas, pakeitus cementą iki 20 % stiklo apdirbimo atliekomis, rodo, kad kristalizuojantis priedas efektyviai mažina atvirąjį poringumą ir tuo pačiu didina uždarytųjų porų kiekį, nepaisant bendro poringumo padidėjimo.



3.22 pav. Poringumo parametrų priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio
Fig. 3.22. Dependence of porosity parameters on the amount of glass processing waste

3.23 pav. pateikti atvirojo ir uždarojo poringumo bei vandens įgėrio ir uždarojo poringumo santykiai, iliustruojantys gautus rezultatus. Atvirojo ir uždarojo poringumo santykis nustatytas atvirojo poringumo vertes dalijant iš uždarojo poringumo verčių, o vandens įgėrio ir uždarojo poringumo santykis gautas vandens įgėrio vertes dalijant iš uždarojo poringumo verčių.

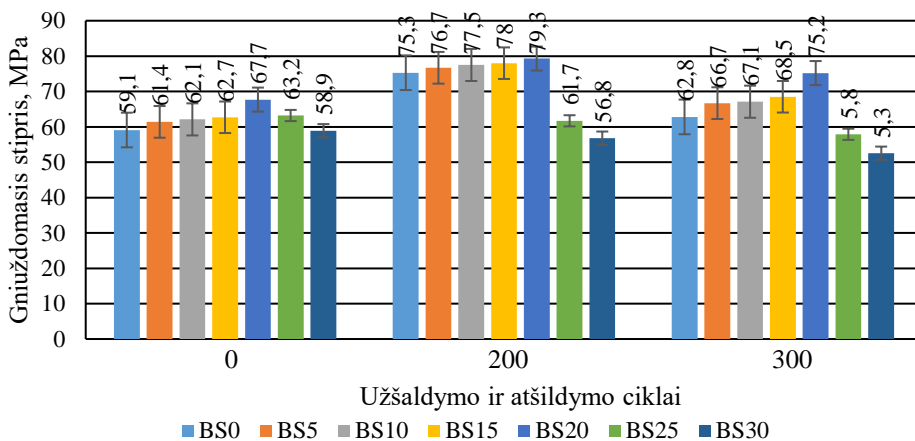


3.23 pav. Santykiai tarp atvirojo ir uždarojo poringumo bei tarp vandens įgėrio ir uždarojo poringumo
Fig. 3.23. Ratios between open and closed porosity and between water absorption and closed porosity

Rezultatai rodo, kad keičiant cementą iki 20 % stiklo apdirbimo atliekomis, uždarytųjų ir atvirųjų porų santykis proporcingai mažėja. Tai patvirtina hipotezę apie sinerginę sąveiką tarp ant stiklo dalelių esančių karbonatų ir kristalizuojančio priedo, kurios mineralai skatina naujų hidratuotų produktų susidarymą tarp stiklo ir cemento dalelių bei porų užsitraukimą. 3.23 pav. pateikta tendencija atspindi stiklo apdirbimo atliekų kiekio poveikį betono struktūrai. Viršijus 20 % pakeitimą, atvirųjų porų kiekis ima dominuoti, o bendras poringumas didėja, nes naujadarai nebekompensuoja atvirųjų porų susidarymo.

3.5. Stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlamo poveikis tvaraus betono ilgaamžiškumui

Prieš šalčio atsparumo bandymus bandiniai tirti gniuždomojo stiprio atžvilgiu, taikant tūrinio šaldymo metodą. Stipris nustatytas taip pat po 200 ir 300 užšaldymo-atšildymo ciklų. Tūrinio užšaldymo bandymuose taikyta 3 % NaCl tirpalo šaldymo terpė. Gniuždomojo stiprio rezultatai prieš ir po užšaldymo pateikti 3.24 pav.



3.24 pav. Gniuždomojo stiprio prieš ir po užšaldymo ir atšildymo ciklų priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio

Fig. 3.24. Dependence of compressive strength before and after freeze–thaw cycles on the amount of glass processing waste

Didinant stiklo apdirbimo atliekų dalį mišinyje iki 20 % gniuždomojo stipris didėja; viršijus šią ribą, tolesnis atliekų kiekio padidėjimas lėmė stiprio sumažėjimą. Konkrečiai bandinys, kuriame 15 % cemento buvo pakeista stiklo apdirbimo

atliekomis, parodė 14,6 % stiprio prieaugį, palyginti su kontroliniu bandiniu. Šį pagerėjimą galima paaiškinti keliais veiksniais: smulkios stiklo dalelės atlieka mikroužpildo funkciją, užpildo tuštumas ir tankina mikrostruktūrą (Abbas et al., 2021); tarp stiklo dalelių ir kristalizuojančio priedo gali vykti sinerginė sąveika, skatinanti papildomų hidratacijos produktų susidarymą ir porų užgijimą; puzolaniškumas gali skatinti C–S–H formavimąsi, didinant gniuždomąjį stiprį (Barauskas et al. 2022).

Kai cemento pakeitimas viršija 20 %, gniuždomasis stipris ima mažėti. Bandinys su 30 % stiklo apdirbimo atliekų parodė šiek tiek mažesnę stiprį nei kontrolinis bandinys. Tokį sumažėjimą tikėtina lemia padidėjęs uždarytųjų porų ir bendras poringumas bei per didelis smulkių stiklo dalelių kiekis, dėl kurio silpnėja dalelių sujungimo jėgos (Vasan et al., 2024).

Įvertinus gniuždomąjį stiprį po 200 ir 300 užšaldymo-atšildymo ciklų, pastebėta panaši tendencija kaip ir prieš bandymus. Bandiniuose, kuriuose iki 20 % cemento pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, po 200 arba 300 ciklų reikšmingo stiprio sumažėjimo nenustatyta. Priešingai, bandiniuose su daugiau nei 20 % atliekų po ciklų fiksuotas reikšmingas stiprio sumažėjimas, greičiausiai dėl padidėjusio poringumo, kuris skatina pažeidimus ir įtrūkimus. Gniuždymo stiprio pokyčiai po 200 ir 300 ciklų pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Gniuždomojo stiprio kitimas po tūrinių užšalimo-atšildymo ciklų

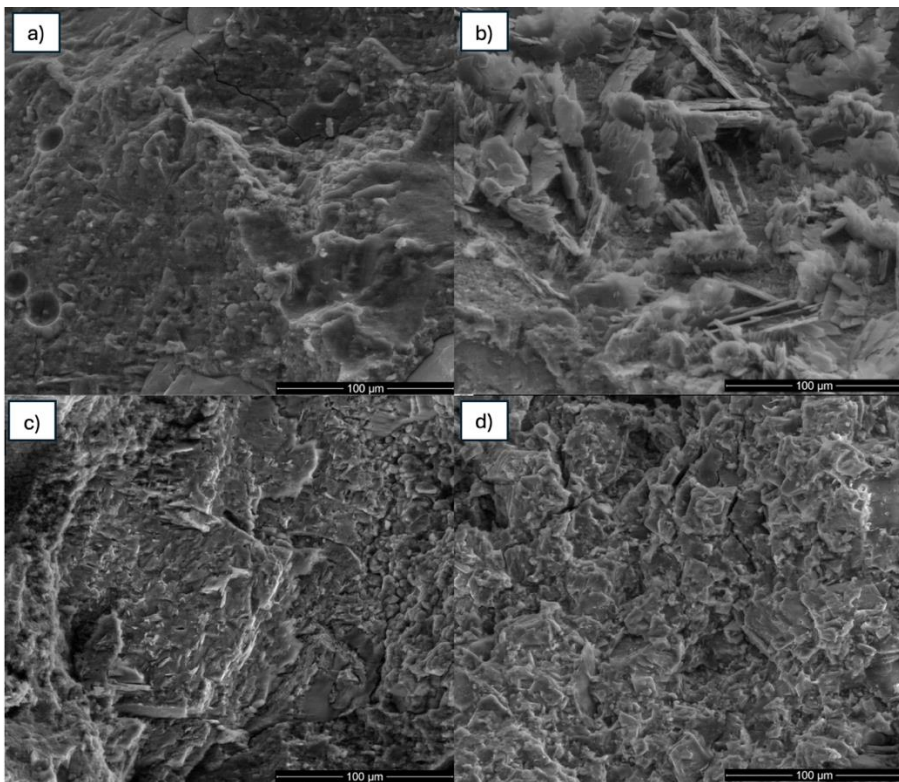
Table 3.1. Variation in compressive strength following volumetric freeze–thaw cycles

Žymuo	Gniuždymo stiprio pokytis po 200 ciklų, %	Gniuždymo stiprio pokytis po 300 ciklų, %
BS0	27,4	6,3
BS5	24,9	8,6
BS10	24,8	8,1
BS15	21,1	9,3
BS20	17,1	11,1
BS25	–2,8	–8,4
BS30	–3,6	–10,8

Kaip rodo gniuždomojo stiprio pokyčiai po užšaldymo-atšildymo ciklų, bandiniai, kuriuose iki 20 % cemento buvo pakeista stiklo apdirbimo atliekomis, po 200 ciklų parodė gniuždomojo stiprio padidėjimą – vidutiniškai apie 23 %. Manoma, kad stiklo apdirbimo atliekų ir kristalizuojančio priedo sąveika lemia naujų junginių formavimąsi, gerinant mikrostruktūrą. Po 300 ciklų tų pačių bandinių

gniuždymo jėga taip pat nesumažėjo, palyginti su bandiniais prieš šalčio bandymus – fiksuotas vidutinis jėgos padidėjimas apie 8,7 %. Šis pagerėjimas priskiriamas stiklo apdirbimo atliekų indėliui į tankesnę betono struktūrą ir naujų produktų susidarymui tarp stiklo dalelių ir kristalizuojančio priedo (Abbas et al., 2021). Didesnė stiklo dalelių specifinė paviršiaus sritis gerina sukibimą tarp cemento tešlos ir stiklo miltelių, stiprindama matricą (Harbec et al., 2017).

Bandiniais prieš ir po šaldymo bandymų atlikti SEM tyrimai; sukietėjusio betono nuotraukos pateiktos 3.25 pav. Vaizdai a) ir b) – prieš šaldymą: a) kontrolinis bandinys BS0, b) BS20 (20 % stiklo apdirbimo atliekų). Vaizdai c) ir d) – po 300 ciklų: c) BS20, d) BS30 (30 % stiklo apdirbimo atliekų).

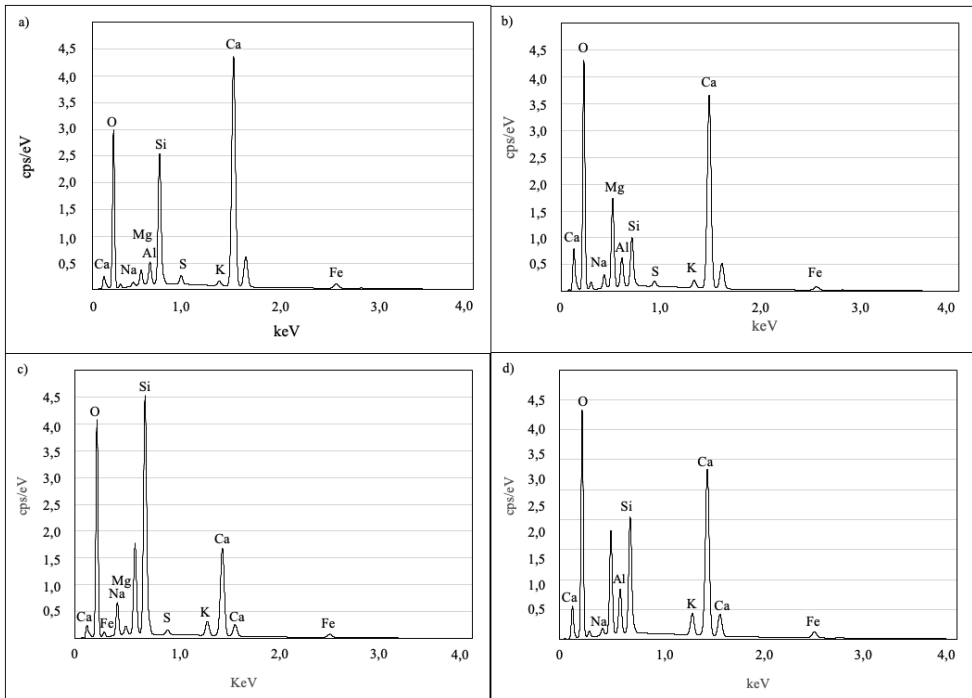


3.25 pav. Betono bandinių mikrostruktūra prieš ir po šaldymo ir atšildymo ciklų: a) – BS0 prieš bandymus; b) – BS20 prieš bandymus; c) – BS20 po 300 šaldymo ir atšildymo ciklų; d) – BS30 po 300 šaldymo ir atšildymo ciklų

Fig. 3.25. Concrete specimens before and after freezing and thawing cycles: a) BS0 before testing; b) BS20 before testing; c) BS20 after 300 freezing and thawing cycles; d) BS30 after 300 freezing and thawing cycles

Prieš šaldymą matomi sveiki paviršiai ir nepažeista struktūra; b) nuotraukoje matomos portlandito plokštelės ir etringito ilgi smailejantys adatinės formos kristalai. Pateiktose nuotraukose c) ir d) matoma, kad po 300 šaldymo ir atšildymo ciklų medžiagos paviršius yra pažeistas, nelygus, matomos portlandito plokštelės praradusios savo formą, pradėjusios irti, o etringito adatos formos kristalų atpažinti nebeįmanoma dėl jų suirimo.

Tų pačių bandinių cheminę sudėtį įvertinta taikant EDX analizę. Gauti rezultatai pateikti 3.26 pav. Išbandyti bandiniai BS0 ir BS20 prieš šaldymo-atšildymo ciklus, o po 300 ciklų tirti BS20 ir BS30.



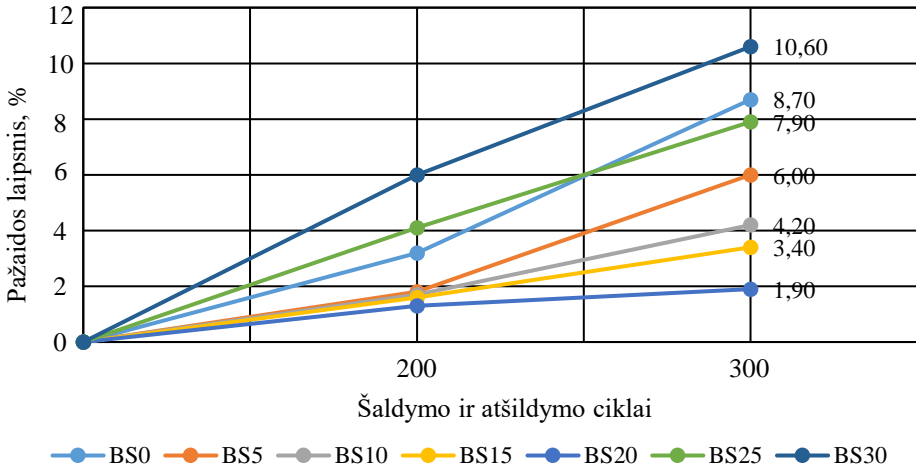
3.26 pav. Betono cheminė sudėtis EDX metodu: a) – BS0 prieš bandymus, b) – BS20 prieš bandymus, c) – BS20 po 300 šaldymo ir atšildymo ciklų, d) – BS30 po 300 šaldymo ir atšildymo ciklų

Fig. 3.26. Chemical composition of concrete using EDX method: a) BS0 before testing; b) BS20 before testing; c) BS20 after 300 freezing and thawing cycles; d) BS30 after 300 freezing and thawing cycles

Lyginant kontrolinį bandinį BS0 su BS20 matyti, kad kontroliniame bandinyje aptinkama mažiau deguonies ir didesni kiekiai kalčio bei silicio. Po 300 šaldymo-atšildymo ciklų BS20 rodė padidėjusį silicio kiekį ir sumažėjusį kalčio

kiekį, o BS30 – neparodė didesnio silicio kiekio, tačiau buvo nustatytas padidėjęs deguonies ir kalcio kiekis.

Vertinant vidaus struktūros blogėjimą pagal pažaidos laipsnį, analizuoti pokyčiai po 200 ir 300 užšaldymo-atšildymo ciklų. Rezultatai pateikti 3.27 pav.



3.27 pav. Betono su stiklo apdirbimo atliekomis pažaidos laipsnis po 200 ir 300 užšalimo-atšildymo ciklų

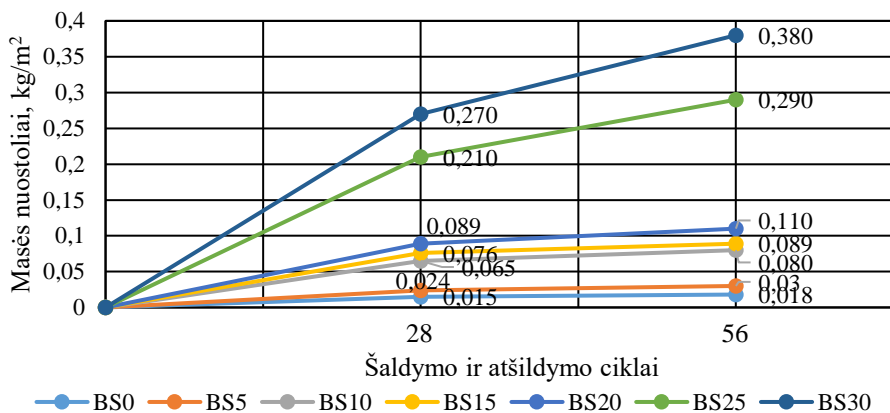
Fig. 3.27. Results of the degree of damage of concrete with glass processing waste after 200 and 300 freeze–thaw cycles

Pastebėta, kad mišiniuose su iki 20 % stiklo apdirbimo atliekų užfiksuota mažiau vidaus pažeidimų užšaldymo-atšildymo ciklų metu, palyginti su kontroliniu bandiniu. Po 300 ciklų bandinys, kuriame buvo 20 % stiklo apdirbimo atliekų, patyrė 82 % mažiau vidaus pažeidimų nei kontrolinis bandinys. Šį pagerėjimą galima priskirti geresnei betono mikrostruktūrai su mažesnėmis ir uždaromis poromis, pagerėjusiai vidaus porų struktūrai, geriau tarpusavyje sujungtomis poroms ir sumažėjusiam kapiliarinių porų skaičiui – tai didina mišinio sutankinimą ir atsparumą šalčiui. Be to, pagal osmosinio slėgio teoriją, mažesnės poros užšąla žemesnėse temperatūrose (Zhang et al., 2020).

Priešingai, mišiniuose, kuriuose stiklo apdirbimo atliekų daugiau nei 20 %, po 200 užšaldymo-atšildymo ciklų užfiksuoti didesni vidaus struktūriniai pažeidimai, palyginti su kontroliniais bandiniais. Po 300 ciklų betonų vidaus struktūros pblogėjimas mišiniuose be atliekų buvo vienas didžiausių, tik šiek tiek viršytas mišinio su 30 % stiklo apdirbimo atliekų. Tai greičiausiai lemia per didelis smulkių stiklo dalelių kiekis, kuris padidina atvirąjį poringumą, pagerina vandens įgeriamumą ir lėmė daugiau porų bei mikroįtrūkimų vidinėje struktūroje. Taip pat tai

galima paaiškinti ribotu energijos sugėrimu ir mažesniu deformacijų atsparumu stiklo dalelėms, dėl ko nuolatiniai užšaldymo-atšildymo ciklai palaipsniui blogina vidaus porų ir įtrūkimų struktūrą bei mažina atsparumą šalčiui.

Masės nuostoliai – svarbus veiksnys vertinant atsparumą šalčiui. Gauti rezultatai pateikti 3.28 pav.



3.28 pav. Masės nuostolių priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio
Fig. 3.28. Dependence of mass loss on the amount of glass processing waste

Užšalant betonas paprastai sugeria daugiau vandens, todėl padidėja bandinio masė. Šis padidėjimas dėl vandens įsigėrimo iš dalies gali kompensuoti nuostolius dėl betono pleišėjimo ar trupėjimo – tokią tendenciją stebėta kontroliniame bandinyje. Tačiau betonas su stiklo apdirbimo atliekomis parodė didesnius masės nuostolius. Keičiant iki 30 % cemento stiklo apdirbimo atliekomis, fiksuotas nuolatinis masės nuostolių padidėjimas. Konkrečiai, bandinys su 20 % atliekų po 56 užšaldymo-atšildymo ciklų patyrė masės nuostolius, šešis kartus didesnius nei kontrolinis bandinys. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad bandiniai su stiklo atliekomis, turintys tankią stiklo struktūrą, sugeria mažiau vandens pradiname etape, todėl didesnė dalis pažeidimų atsiskleidžia kaip masės nuostoliai.

Reikšmingas masės nuostolių padidėjimas pastebėtas mišiniuose su 25 % ir 30 % stiklo apdirbimo atliekų: po 56 ciklų nuostoliai buvo atitinkamai ~16 ir ~21 karto didesni nei kontrolinio bandinio. Masės nuostoliai pasireiškė smulkiu pleišėjimu, kai dalelės nuo paviršiaus nulūždavo ir atsivėrė ertmės. Taip pat fiksuotas plonas cemento skiedinio sluoksnio atsiskuosiavimas, atskleidžiantis vidines poras. Didesni nuostoliai užfiksuoti atvirosiose poringose srityse, kur stiklo dalelės leido giliau prasiskverbti vandeniui, skatindamos tolesnį masės netekimą.

Šarminės korozijos bandymai atlikti siekiant įvertinti stiklo apdirbimo atliekų įtaką jos susidarymui. Bandymai atlikti pagal plačiai taikomą RILEM metodiką.

Nustatytas bandinių ilgio pokytis po 5, 10, 15 ir 20 savaičių pateiktas procentais (3.2 lentelėje). Didėjant stiklo apdirbimo atliekų kiekiui nuo 0 % iki 30 %, pastebėtas ilgio pokyčio mažėjimas: kuo daugiau atliekų mišinyje, tuo mažesnis ilgio pokytis.

3.2 lentelė. Ilgio pokyčio rezultatai, gauti veikiant šarmams, esant skirtingam stiklo apdirbimo atliekų kiekiui

Table 3.2. Results of length change with different amounts of glass processing waste under the influence of alkalis

Žymuo \ Savaitės	5	10	15	20
BS0	0,012 %	0,041 %	0,054 %	0,061 %
BS5	0,013 %	0,037 %	0,049 %	0,054 %
BS10	0,015 %	0,036 %	0,043 %	0,047 %
BS15	0,015 %	0,031 %	0,033 %	0,037 %
BS20	0,018 %	0,03 %	0,03 %	0,032 %
BS25	0,019 %	0,027 %	0,029 %	0,03 %
BS30	0,02 %	0,022 %	0,023 %	0,026 %

Atlikus pirmuosius matavimus po 5 savaičių nustatyta, kad mažiausias ilgio pokytis užfiksuotas kontroliniame bandinyje – 0,012 %, o didžiausias – bandinyje su 30 % stiklo apdirbimo atliekų – 0,02 %. Po 10 savaičių matyti, kad ilgio pokytis bandinyje su 30 % atliekų buvo 0,022 %, o kontroliniame – 0,041 %. Tai rodo, kad mišiniuose su stiklo apdirbimo atliekomis, veikiant šarmams, susidaro mažiau gelio ir kitų junginių, todėl jie yra atsparesni šarmams.

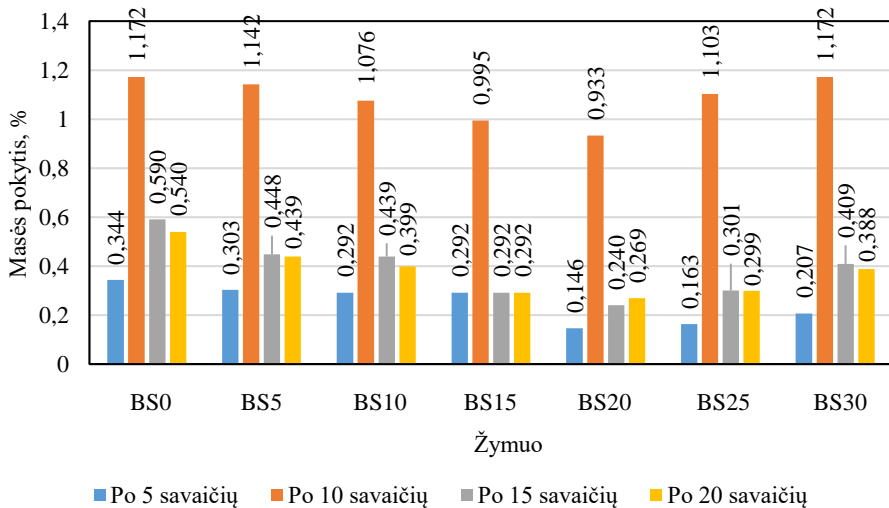
Po 15 savaičių didžiausias ilgio pokytis (0,054 %) buvo kontroliniame bandinyje – viršyta 0,05 % riba. Antras pagal dydį pokytis (0,049 %) fiksuotas bandinyje su 5 % stiklo apdirbimo atliekų. Mažiausias pokytis (0,023 %) buvo bandinyje su 30 % atliekų.

Po 20 savaičių didžiausi pokyčiai, viršijantys 0,05 % ribą, užfiksuoti kontroliniuose bandiniuose ir bandiniuose su 5 % atliekų (atitinkamai 0,061 % ir 0,054 %). Visuose kituose bandiniuose ilgio pokytis buvo mažesnis. Didėjant stiklo apdirbimo atliekų kiekiui mišinyje, ilgio pokytis mažėjo; mažiausias susitraukimas gautas bandiniuose su 30 % atliekų – 0,026 %.

Betonas, kurio ilgio pokytis neviršija 0,05 %, gali būti laikomas atspariu šarminei korozijai (Lindgard et al., 2010). Remiantis gautais rezultatais, galima da-

ryti išvadą, kad didesnis stiklo apdirbimo atliekų kiekis mažina ilgio pokytį ir šarminės korozijos riziką – tai sutampa su kai kurių mokslininkų išvadomis, kad smulkios stiklo dalelės betone mažina šarminės korozijos riziką.

Masės pokytis po 5, 10, 15 ir 20 savaičių įvertintas šarminės korozijos bandymų metu, esant skirtingam stiklo apdirbimo atliekų kiekiui (3.29 pav.).



3.29 pav. Masės pokyčio priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio veikiant šarmams

Fig. 3.29. Dependence of mass change on the amount of glass processing waste under the influence of alkalis

Po 5 savaičių visuose bandiniuose fiksuotas masės padidėjimas; mišiniuose su iki 20 % stiklo apdirbimo atliekų masės pokytis mažėjo, o didinant atliekų kiekį – masės pokytis vėl didėjo. Didžiausias masės prieaugis po 5 savaičių užfiksuotas kontroliniuose bandiniuose – 0,344 %, mažiausias – bandiniuose su 20 % atliekų (0,146 %).

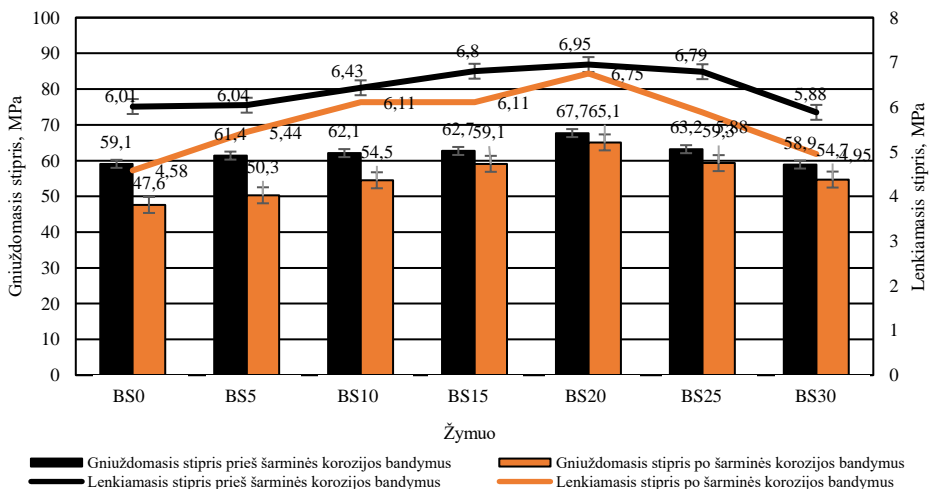
Po 10 savaičių tendencija išliko, tačiau žymus masės prieaugis matytas visuose bandiniuose. Didžiausias masės pokytis fiksuotas kontroliniame ir 30 % atliekų bandiniuose – po 1,172 %. Mažiausias – bandinyje su 20 % atliekų (0,933 %).

Po 15 ir 20 savaičių masės pokyčiai reikšmingai sumažėjo ir stabilizavosi. Tendencija išliko: iki 20 % pakeitimo masės pokytis mažėja, o didinant atliekų kiekį – vėl didėja. Po 20 savaičių mažiausias masės pokytis buvo bandiniuose su 20 % atliekų – 0,269 %, o didžiausias – kontroliniuose bandiniuose – 0,540 %. Panašius rezultatus, susijusius su masės nuostoliais, patebėjo ir kiti mokslininkai (Saint-Pierre et al., 2007).

Iki 10 savaičių didesni masės pokyčiai paaškinami bandinių įgėrių į tirpalą; vėliau masės prieaugis stabilizuojasi. Jei po 10 savaičių masės pokyčiai stabilūs (nėra nuolatinio prieaugio), tai rodo didesnę atsparumą šarmų poveikiui – esant aktyviai šarminėi korozijai, masės prieaugis, susijęs su gelio formavimusi, tęstųsi.

Po šarminės korozijos bandymų nustatyti gniuždomasis ir lenkiamasis stipriai, siekiant įvertinti mechaninių savybių pokyčius (rezultatai – 3.30 pav.). Betono prizmės bandytos po 28 parų kietėjimo prieš šarminius bandymus ir po 140 parų po jų. Gniuždomasis stipris sumažėjo visuose bandiniuose; didžiausias pokytis pastebėtas kontroliniame bandinyje – stipris sumažėjo beveik 19,5 %, palyginti su prieš bandymus matuotu rezultatu. Mažiausias stiprio sumažėjimas užfiksuotas bandinyje, kuriame 20 % cemento buvo pakeista stiklo apdirbimo atliekomis: po šarminės korozijos bandymų gniuždomasis stipris buvo 65,1 MPa – tik apie 4 % mažesnis nei prieš bandymus, t. y. mažiausias sumažėjimas tarp visų bandinių.

Gavus lenkiamojo stiprio rezultatus, pastebėta tokia pati tendencija kaip ir gniuždomojo stiprio atveju.



3.30 pav. Gniuždomojo ir lenkiamojo stiprių priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio prieš ir po šarminės korozijos bandymų

Fig. 3.30. Dependence of compressive strength and bending strength on the amount of glass processing waste before and after alkaline corrosion tests

Atlikus lenkiamojo stiprio bandymus po šarminės korozijos, visuose bandiniuose gauti mažesni stiprio rodikliai, palyginti su mėginiais prieš tyrimą. Didžiausias lenkiamojo stiprio sumažėjimas fiksuotas kontroliniuose bandiniuose (be stiklo apdirbimo atliekų) – 23 %, o bandiniuose su 30 % stiklo apdirbimo atliekos lenkiamasis

stipris sumažėjo 15 %. Mažiausias stiprio sumažėjimas ir didžiausias galutinis lenkiamasis stipris nustatyti bandiniuose su 20 % stiklo apdirbimo atliekų: po šarminės koroziijos jų stipris siekė 6,75 MPa ir sumažėjo apie 3 %.

3.6. Tvaraus betono poveikio aplinkai vertinimas

Norint įvertinti betono tvarumą, būtina apskaičiuoti jo visuotinio atšilimo potencialą (GWP). Šis rodiklis nurodo, kiek šiltnamio efektą sukeliančių dujų per tam tikrą laiką sulaikoma atmosferoje, palyginti su CO₂. Betono GWP skaičiuotas sumuojant kiekvienos sudėtinės medžiagos GWP vertes, nurodytas jų aplinkosauginėse produkto deklaracijose (EPD).

Skaičiuojant CO₂ emisiją 1m³ betono, remtasi tik medžiagų GWP vertėmis. 3.3 lentelėje pateikti duomenys atspindi kiekvienos medžiagos įtaką bendram betono emisijos rodikliui.

3.3 lentelė. CO₂ emisijos kiekis, tenkantis 1m³ betono pagal kiekvieną sudedamąją dalį
Table 3.3. CO₂ emission per 1m³ of concrete from each component of concrete

Žymuo CO ₂ emisijos	BS0	BS5	BS10	BS15	BS20	BS25	BS30
Cementas, kgCO _{2eq}	359,60	341,62	323,64	305,66	287,68	269,70	251,72
Stiklo apdirbimo atliekos, kgCO _{2eq}	0,00	0,24	0,47	0,71	0,95	1,19	1,42
Smėlis, kgCO _{2eq}	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
Dolomito skaldas, kgCO _{2eq}	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97
Superplastiklis, kgCO _{2eq}	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
Orą įtraukianti įmaiša, kgCO _{2eq}	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Betono šlamas, kgCO _{2eq}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kristalizuojantis priedas, kgCO _{2eq}	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68

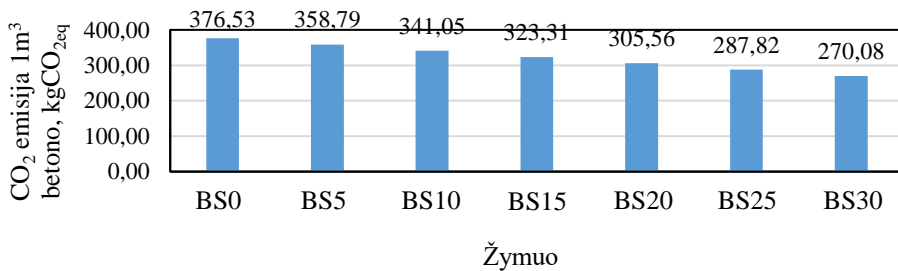
Naudotų medžiagų GWP rodikliai: cemento CEM I 42,5 R – 0,899 kgCO_{2eq}/kg, smėlio (smulkiojo užpildo) – 0,00197 kgCO_{2eq}/kg, dolomitinės skaldos (stambaus užpildo) – 0,00286 kgCO_{2eq}/kg, superplastiklio –

0,514 kgCO_{2eq}/kg, orą įtraukiančios įmaišos – 0,439 kgCO_{2eq}/kg, o kristalizuojančio priedo – 2,67 kgCO_{2eq}/kg. Betono šlamo GWP vertė prilyginta nuliui, nes tai gamybos vietoje susidaranti atliekos, kurios nereikia transportuoti. Vertinant stiklo apdirbimo atliekų GWP, atsižvelgta tik į jų gabenimą: transportavimo atstumas nuo Alytaus iki Vilniaus – 92 km, o emisija – 0,000129 kgCO₂/(kg·km). Gauta stiklo atliekų GWP vertė siekia 0,012 kgCO_{2eq}/kg.

Skaičiuojant CO₂ emisijas, nebuvo vertinama visų žaliavų transportavimo įtaka, nes atstumai, vienu metu gabenamų medžiagų kiekiai ir transporto priemonių rūšys, jų tarša gali labai skirtis. Taip pat nebuvo vertinamos pačios betono gamybos emisijos, kadangi jos tiesiogiai priklauso nuo gamyklos eksploatavimo būdo, susidarantių atliekų kiekio, naudojamų energijos šaltinių ir įrangos.

Pagal Pasaulio verslo tarybos tvariai plėtrai (WBCSD) ir Tarptautinės betono tvarumo programos (IFCS) ataskaitas, betono gamybos CO₂ emisijos sudaro maždaug 10–15 % bendro 1m³ tenkančio kiekio (dažniausiai svyruoja nuo 15 iki 43 kg CO_{2eq}/m³). Palyginti su bendru produkto poveikiu, gamybos emisijos yra gerokai mažesnės, tačiau, siekiant tiksliai įvertinti ekologinį pėdsaką, į jas reikėtų atsižvelgti.

Susumavus medžiagų CO₂ emisijas 1m³ betono, gautos bendros vertės pateikiamos 3.31 paveiksle.



3.31 pav. CO₂ emisijos kiekio priklausomybė nuo stiklo apdirbimo atliekų kiekio 1m³ betono

Fig. 3.31. Dependence of CO₂ emission on the amount of glass processing waste per 1m³ of concrete

Tyrimo metu vertintos 7 betono sudėtys. Pirmoji – kontrolinė (be stiklo apdirbimo atliekos) sudėtis, kurioje 5 % smėlio pakeista betono šlamu. Nuo antros iki septintos sudėties dalis cemento keista stiklo apdirbimo atliekomis. Analizė rodo, kad didžiausią CO₂ emisijų dalį sudaro cementas (nuo 359,60 iki 251,72 kg CO_{2eq}/m³). Kita reikšminga medžiaga – kristalizuojantis priedas (10,68 kg CO_{2eq}/m³). Kitų žaliavų (smėlio, dolomitinės skaldos, superplastiklio ir orą įtraukiančios įmaišos) įtaka yra labai nežymi: atitinkamai 1,67; 2,97; 1,44 ir

0,18 kg CO_{2eq}/m³. Taigi, efektyviausias būdas mažinti betono emisijas – mažinti cemento kiekį.

Sudėtyse, kur cementas keistas stiklo apdirbimo atliekomis, stebimas ryškus pokytis: pavyzdžiui, pakeitus 20 % cemento, emisijos sumažėjo beveik 19 %, o panaudojus 30 % stiklo atliekų – net 28 %. Tokį žymų kritimą lemia tai, kad atliekinių priedų emisijos yra nepalyginamai mažesnės už cemento. Tai įrodo, kad papildomos cementinės medžiagos yra ypač efektyvi priemonė betono pramonei tapti tvaresnei.

3.7. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus cemento akmens su betono šlamu savybių tyrimus nustatyta, kad:

- 1.1. Sauso betono šlamo priedas (iki 30 %) dėl užpildo efekto padidina cemento tešlos sklidumą iki 17 %. Tuo tarpu šlapias šlamas (pakeičiant 60 % vandens) sklidumą sumažina iki 82 %, nes suspensijoje esantys hidratacijos produktai – etringitas ir larnitas, ir didelis dalelių paviršiaus plotas galimai didina vidinę trintį bei spartina struktūros formavimąsi.
- 1.2. Šlapias betono šlamas (apie 70 % vandens) modifikuoja cemento akmens hidrataciją: klinkerio mineralų (C₃S ir C₂S) sumažėjimas apie 10 % rodo pagreitintą pradinę hidrataciją, galimai skatinamą šlame esančių hidratacijos produktų, veikiančių kaip kristalizacijos centrai. Šlapias šlamas padidina etringito ir CSH junginių kiekį (iki 6 %), o tai lemia tankesnės mikrostruktūros formavimąsi, išlaikant stabilų portlandito kiekį (41–45 %).
- 1.3. Tankio tyrimai parodė, kad šlapias betono šlamas tankina mikrostruktūrą – tankis padidėjo nuo 2169 kg/m³ iki 2257 kg/m³. Tai siejama su didesne cemento hidratacijos išėiga ir smulkių dalelių dominavimu, kurių vidutinis dydis apie 16 μm.
- 1.4. Naudojant sausą betono šlamą (iki 30 %) dėl mažo piltinio tankio ir prasto dalelių susitankinimo cemento akmens tankis sumažėjo nuo 2169 kg/m³ iki 2079 kg/m³, palyginti su kontroliniu bandiniu.
- 1.5. Sausas betono šlamas mažina cemento akmens stiprį dėl klinkerio koncentracijos kritimo ir prasto dalelių homogeniškumo. Priešingai, šlapias šlamas (pakeičiant 60 % vandens) gniuždomąjį ir lenkiamąjį stiprius padidina atitinkamai apie 31 % ir 33 %, nes jame esantys hidratatai (etringitas, larnitas) galimai veikia kaip kristalizacijos centrai, formuojantys vientisesnę C–S–H struktūrą.

2. Atlikus cemento akmens su stiklo apdirbimo atliekomis savybių tyrimus nustatyta:

- 2.1. Stiklo apdirbimo atliekos (iki 30 %) po 10 minučių nuo užmaišymo reikšmingai padidina mišinio klampą. Tai lemia didelis dalelių dispersiškumas,

dalelių dydis ir specifinis paviršiaus plotas, kuris intensyviai adsorbuoja laisvąjį vandenį bei skatina ankstyvąją pucolaninę sąveiką su cemento hidratacijos produktais.

- 2.2. Stiklo apdirbimo atliekos (iki 30 %) padidina cemento akmens tankį nuo 2147 kg/m³ iki 2199 kg/m³, palyginti su kontroliniu bandiniu. Tai lemia sinerginius mikroužpildo efektas ir stiklo dalelių (~4 μm) pucolaninis aktyvumas: smulkios dalelės užpildo tarpkristalines poras, o antrinės hidratacijos metu susidarantys C–S–H dariniai mažina bendrą sistemos poringumą.
- 2.3. Cemento keitimas stiklo apdirbimo atliekomis (iki 30 %) padidina gniuždomąjį stiprį iki 17 %, o lenkiamąjį – iki 12 %. Tai lemia aukštas stiklo dalelių pucolaninis aktyvumas, skatinantis papildomų C–S–H junginių formavimąsi.
3. Atlikus kristalizuojančio priedo poveikio betono savybėms tyrimus nustatyta:
 - 3.1. Kristalizuojantis priedas (iki 1,4 %) nuo cemento masės, nežymiai sumažina betono tankį (~2 %) ir gniuždomąjį stiprį (iki 47,2 MPa). Tai siejama su padidėjusiu bendruoju poringumu, nors esant rekomenduojamam priedo kiekiui vytauja uždarosios poros.
 - 3.2. Rekomenduojamas 1,0 % kristalizuojančio priedo kiekis betono traukumą sumažina iki 1,8 %. Tai lemia kapiliarinėse porose augantys netirpūs kristaliniai dariniai, kurie suformuoja vidinį karkasą.
4. Nustačius stiklo apdirbimo atliekos poveikį tvaraus betono savybėms pastebėta:
 - 4.1. Betono mišiniuose, didesnę cemento dalį pakeitus atliekomis, išsiskiria mažesnis šilumos kiekis, o hidratacinės temperatūros maksimumas pasiekiamas per ilgesnį laiką.
 - 4.2. Didinant stiklo atliekų kiekį (iki 30 %), betono tankis sumažėja nuo 2455 kg/m³ iki 2314 kg/m³, o ultragarso impulso greitis – nuo 4911 m/s iki 4676 m/s, palyginti su kontroliniu bandiniu. Tai lemia mažesnis stiklo piltinis tankis ir klinkerio mineralų koncentracijos kritimas. Keičiant iki 15 % cemento, fizikiniai savybės kinta minimaliai, nes smulkios stiklo dalelės užtikrina efektyvų mikroužpildo efektą ir matricos vientisumą.
 - 4.3. Tyrimais grįsta 20 % cemento pakaita stiklo atliekomis užtikrina mažiausią vandens įgeriamumą (iki 2,42 %) ir iki 13 % mažesnę įgeriamumo indeksą ($0,72 \times 10^{-2}$ cm/min⁰⁵). Tai lemia mikroužpildo efektas ir pucolaninė reakcija: stiklo dalelės užpildo kapiliarines poras, o antrinė hidratacija stambias poras transformuoja į smulkias. Viršijus 20 % ribą, įgeriamumas didėja dėl klinkerio trūkumo ir nepakankamo antrinių hidratų kiekio.
 - 4.4. Naudojant 20 % stiklo atliekų ir kristalizuojantį priedą, atvirasis poringumas sumažėja apie 8,5 %, o uždasis padidėja iki 55 %. Šį pokytį galima lemti stiklo dalelių pucolaninė reakcija, kuri suskaido kapiliarinius kanalus, o kristalizuojantis priedas skatina netirpių kristalinių darinių augimą, transformuojant atvirąsias poras į uždąsias izoliuotas tuštumas.

- 4.5. Betono traukumas netiesiškai priklauso nuo stiklo atliekų kiekio: keičiant iki 15 % cemento, traukumas mažėja dėl mikroužpildo efekto, pucolaninės reakcijos ir padidėjusio karkaso standumo. Viršijus 15 % ribą, deformacijos auga dėl klinkerio mineralų trūkumo ir santykinio vandens pertekliaus, lemiančio didesnę kapiliarinę poringumą.
- 4.6. Naudojant iki 20 % stiklo atliekų, betono gniuždomasis stipris po 200–300 šaldymo ciklą nesumažėja. Tai lemia tęstinę stiklo dalelių pucolaninė reakcija ir kristalizuojančio priedo skatinamas porų užpildymas. Tačiau viršijus 20 % ribą, paviršiaus atskilinėjimo nuostoliai auga dėl klinkerio mineralų deficito. Nustatyta 20 % stiklo atliekų riba yra rekomenduojama tūriniam stabilumui ir struktūriniam vientisumui agresyviomis šalčio sąlygomis užtikrinti.
- 4.7. Stiklo apdirbimo atliekos (30 %) po 20 savaičių bandinių ilgio pokytį dėl šarminės korozijos sumažina nuo 0,061 % iki 0,026 %. Tai lemia aukštas stiklo dalelių pucolaninis aktyvumas: reakcija su portlanditu mažina pH vertę ir sunaudoja šarmus dar iki susidarant brinkstantiems geliams. Tanki mikrostruktūra blokuoja šarminių tirpalų skverbimąsi, o 15–30 % stiklo apdirbimo atliekos užtikrina mažesnę nei 0,05 % santykinę pailgėjimą, patvirtindamas aukštą kompozito atsparumą.
- 4.8. Stiklo apdirbimo atliekos (iki 20 %) betono masės pokytį dėl šarminės korozijos sumažina nuo 0,540 % iki 0,269 %. Šis reiškinys aiškinamas stiklo dalelių pucolaniniu aktyvumu: jos „suriša“ laisvuosius šarmus ir portlanditą į stabilius C–S–H gelius, slopindamos ekspansyvių šarminę silikatų reakciją (ASR). Viršijus 20 % ribą, masės pokytis didėja dėl klinkerio mineralų deficito ir mažesnio matricos tankio.
- 4.9. Gyvavimo ciklo analizė (LCA) parodė, kad cemento keitimas stiklo atliekomis 20 % CO₂ emisijas sumažina 19 %, o smėlio keitimas betono šlamu yra ekologiškai mažareikšmis (0,09 kgCO_{2eq}/m³). Šis efektas grindžiamas tiesioginiu klinkerio kiekio mažinimu ir mažesnėmis atliekų paruošimo energijos sąnaudomis. Rekomenduojama 20 % pakaita leidžia pasiekti reikšmingą dekarbonizacijos efektą (19 %), išlaikant betono mechaninį stiprį bei atsparumą šalčiui ir šarminiai korozijai.

Bendrosios išvados

1. Stiklo apdirbimo atliekos yra pucolaniškai aktyvios (aktyvumas ~900), jų dalelių vidutinis dydis apie 4 μm , t. y. ~3 kartus mažesnis nei cemento dalelės. Šie parametrai leidžia stiklo apdirbimo atlieką naudoti kaip pakaitinę cemento medžiagą. Betono šlamos džiovinimo metu praranda iki 70 % masės, kartu su fiziškai nesurištu vandeniu iš dalies pasišalina ir cemento hidratacijos produktuose surištas vanduo. Išdžiovintas betono šlamos nėra pucolaniškai aktyvi medžiaga ir neturi rišamosioms medžiagoms būdingų savybių, todėl negali būti naudojamas kaip pakaitinė cemento medžiaga.
2. Naudojant didesnius drėgno šlamos kiekius, cemento akmens gniuždomasis stipris didėja apie 24 %, palyginti su kontrolinių bandinių vertėmis. Pokytis siejamas su tankesnio cemento akmens formavimusi, mažesniu nesureagavusių C_2S ir C_3S kiekiu bei didesniu hidratacijos produktų kiekiu, kas rodo drėgno betono šlamos poveikį hidratacijos procesams.
3. Didėjant cemento pakeitimui stiklo apdirbimo atliekos kiekiams mišinio masėje iki 30 %, blogėja cemento tešlos reologinės savybės, mišiniai tirštėja. Esant didesniai stiklo kiekiui, vanduo dėl smulkių dalelių ir didelio savitojo paviršiaus sulaukomas stiklo paviršiuje, todėl jo patekimas

- prie cemento dalelių ribojamas. Funkcinės kristalizuojančio priedo inkorporavimas ne tik padidina tešlos sklidumą, bet ir mažina traukumą sukietėjusiame betone dėl tam tikros sudėties hidratų susidarymo.
4. Nustatyta, kad stiklo apdirbimo atliekų naudojimas iki 20 % masės aktyviai modifikuoja mikrostruktūrą, kuri dėl didelio pucolaninio aktyvumo ir užpildo efekto padidina cemento akmens mechanines savybes iki 10 %. Šis reiškinys pagrindžia supratimą apie tyrimais grįstą technologinių atliekų dispersiškumo ir klinkerio santykį: viršijus 20 % ribą, sistemoje susidaro dispersinių dalelių perteklius, kuris keičia mišinio reologiją ir skatina mikroporų atsiradimą, taip blogindama pucolaninės reakcijos teikiamą naudą. Ši dėsninga riba yra kritinė projektuojant mažos CO₂ emisijos betoną, siekiant maksimaliai išnaudoti atliekų potencialą ir išvengti neigiamo poveikio matricos vientisumui.
 5. Ištirtos betono su stiklo apdirbimo atliekomis ilgaamžiškumo savybės atskleidė, kad:
 - Atsparumo šalčiui srityje nustatyta kritinė 20 % cemento pakaitos riba, kuri užtikrina mikrostruktūros transformaciją: stiklo dalelių pucolaninis aktyvumas ir kristalizuojančio priedo sinergija suformuoja uždarytą porų sistemą (jų kiekį padidinant iki 55 %), kuri kompensuoja ledo plėtimosi įtampas ir minimizuoja vidinius pažeidimus. Viršijus šią ribą, klinkerio trūkumas lemia nepakankamą paviršinio sluoksnio mechaninį atsparumą, sukeltą intensyvesnę atskilinėjimą.
 - Šarminės korozijos bandymai parodė, kad stiklo atliekų kiekiui didėjant iki 30 %, proporcingai mažėja plėtimasis dėl pagreitinto laisvųjų šarmų ir portlandito surišimo į stabilius C–S–H gelius. Masės pokyčių stabilizavimas po 10 savaičių patvirtina suformuotos struktūros cheminį atsparumą agresyvioje aplinkoje. Tai suteikia naują supratimą apie galimybę naudoti reaktyvias atliekas ne tik kaip užpildus, bet ir kaip aktyvų ilgaamžiškumą užtikrinantį komponentą.
 6. Įrodyta, kad kompleksinis technologinių atliekų, stiklo apdirbimo atliekų ir betono šlamo integravimas leidžia pasiekti 19 % CO₂ emisijos sumažinimą, kartu išlaikant betono ilgaamžiškumą. Šis rezultatas pagrindžia naują požiūrį į tvarią betono gamybą: klinkerio keitimas iki 20 % stiklo atliekomis užtikrina cheminį-mechaninį balansą dėl pucolaninės reakcijos, o betono šlamo naudojimas vietoj smėlio ir dalies vandens veikia kaip inertinis-mikrostruktūrinis užpildas. Nustatyta 20 % stiklo atliekų riba yra riba, už kurios klinkerio trūkumas tampa dominuojančiu veiksniu, lemiančiu fizikinių ir mechaninių savybių blogėjimą, nepaisant tolesnio ekologinio pėdsako mažėjimo.

Rekomendacijos

Sukurtas tvarus betonas, kuriame stiklo apdirbimo atliekos pakeičia dalį cemento, o betono šlammas – dalį smulkią užpildo. Betonas yra atsparus šalčiui ir šarminei korozijai, užtikrina ilgą tarnavimo laiką. Rekomenduojama tvaraus betono sudėtis 1 m³: cementas – 320 kg, stiklo apdirbimo atliekos – 80 kg, smėlis 0/4 – 845,5 kg, sausas betono šlammas – 44,5 kg, dolomito skalda 4/16 – 1040 kg, superplastiklis – 2,8 kg, orą įtraukianti įmaiša – 0,4 kg, kristalizuojantis priedas – 4 kg, šlapias betono šlammas – 16 kg, vanduo – 144 kg. Tokį tvarų betoną rekomenduojama naudoti gaminant šalčiui atsparius ir ilgaamžius betonus.

Tvaraus betono mišinio, kurio sudėtyje panaudota stiklo apdirbimo atliekos ir betono šlammas, paruošimas:

1. Pirmiausia į betono mišinio maišyklę dozuojamas betono šlammas, smulkusis ir stambusis užpildai, po to mišinys maišomas 15 sekundžių;
2. Į permaišytus užpildus vienu metu dozuojamas cementas ir stiklo apdirbimo atliekos, po to mišinys maišomas 15 sekundžių;
3. Tada į sumaišytą sausą betono mišinį pilamas vanduo ir technologinės įmaišos, galutinis maišymas vykdomas 60 sekundžių;
4. Gautas tvarus betono mišinys išpilamas į autobetonvežes ir transportuojamas, klojamas įprastu būdu;
5. Suformuotas tvarus betono mišinys kietinamas natūraliomis kietėjimo sąlygomis, o kietėjimas vyksta 28 paras.

Literatūra ir šaltiniai

- Abbas, S. (2023). Preventive measures of alkali–silica reaction in concrete buildings: use of hybrid waste coal ash and steel wire cut fibers. *Buildings*, *13*(3), 710. <https://doi.org/10.3390/buildings13030710>
- Abbas, Z. K., Mahdi, H. A., & Tayeh, B. A. (2021). Producing sustainable concrete using nano recycled glass. *The Open Civil Engineering journalJournal*, *15*, 236–243. <https://doi.org/10.2174/1874149502115010236>
- Abbas, Z., Mahdi, H., & Tayeh, B. (2021). Producing sustainable concrete using nano recycled glass. *The Open Civil Engineering journalJournal*, *15*, 236–243. <https://doi.org/10.2174/1874149502115010236>
- Abed, H. S., Al-Saffar, Z. H., & Hamad, A. J. (2024). Synergistic effect of the silica fume and glass powder as pozzolanic materials in cement mortar. *The International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, *15*, 43–56. <https://doi.org/10.22712/susb.20240004>
- Abubakar, I. R., Maniruzzaman, K. M., Dano, U. L., AlShihri, F. S., AlShammari, M. S., Ahmed, S. M. S., Al-Gehlani, W. A. G., & Alrawaf, T. I. (2022). Environmental sustainability impacts of solid waste management practices in the global south. *The International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*, 12717. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912717>

- Adaway, M., & Wang, Y. (2015). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete—effects on compressive strength. *The Electronic Journal of Structural Engineering*, *14*, 116–122. <https://doi.org/10.56748/ejse.141951>
- Afshinnia K., & Rangaraju P. R. (2016). Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, *117*, 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.072>
- Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. (2015). Efficiency of ternary blends containing fine glass powder in mitigating alkali silica reaction. *Construction and Building Materials*, *100*, 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.043>
- Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. (2015). Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali silica reaction in mortars. *Construction and Building Materials*, *81*, 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041>
- Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. (2015). Mitigating alkali silica reaction in concrete: effectiveness of ground glass powder from recycled glass. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, *2508*(1), 65–72. <https://doi.org/10.3141/2508-08>
- Ahmad, J., Zhou, Z., Usanova, K. I., Vatin, N. I., & El-Shorbagy, M. A. (2022). A Step towards Concrete with Partial Substitution of Waste Glass (WG) in Concrete: A Review. *Materials*, *15*, 2525. <https://doi.org/10.3390/ma15072525>
- Ayub, T., Khan, S. U., & Memon, F. A. (2014). Mechanical characteristics of hardened concrete with different mineral admixtures: a review. *The Scientific World Journal*, *2014*(4), 875082. <https://doi.org/10.1155/2014/875082>
- Ali, E. E., & Al-Tersawy, S. H. (2012). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, *35*, 785–791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117>
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Aboshama, A. Y. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, *124*, 866–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>
- Antolik, A., & Jozwiak-Niedzwiedzka, D. (2023). ASR induced by chloride- and formate-based deicers in concrete with non-reactive aggregates. *Construction and Building Materials*, *400*, 132811. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132811>
- Argiz, C., Moragues, A., & Menendez, E. (2018). Use of ground coal bottom ash as cement constituent in concretes exposed to chloride environments. *Journal of Cleaner Production*, *170*, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.117>
- Audo, M., Mahieux, P. Y., & Turcry P. (2016). Utilization of sludge from ready-mixed concrete plants as a substitute for limestone fillers. *Construction and Building Materials*, *112*, 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.044>
- Audo, M., Mahieux, P. Y., Turcry, P., Chateau, L., & Churlaud, C. (2018). Characterization of ready mixed concrete plants dry sludge and incorporation into mortars: origin

- of pollutants. Environmental characterization and impacts on mortars characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 183, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.155>
- Baikarikar A., Mudalgi S., & Ram V. V. (2023). Utilization of waste glass powder and waste glass sand in the production of Eco-Friendly concrete. *Construction and Building Materials*, 377, 131078. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131078>
- Barkauskas K., Nagrockienė D., & Pundienė I. (2022). The effect of pozzolanic waste of different nature on the hydration products, structure and properties of hardened cement paste. *Ceramics-Silikaty*, 66, 218–227. <https://doi.org/10.13168/cs.2022.0016>
- Batayneh M., Marie I., & Asi I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27, 1870–1876. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>
- Bignozzi, M. C., Saccani, A., Barbieri, L., & Lancellotti, I. (2015). Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. *Cement and Concrete Composites*, 55, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.020>
- Bisht K., & Ramana P. V. (2018). Sustainable production of concrete containing discarded beverage glass as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 177, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.119>
- Bleszynski, R. F., & Thomas, M. D. A. (1998). Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions. *Advanced Cement Based Materials*, 7(2), 66–78. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00030-8)
- Borger, J., Carrasquillo, R. L., & Fowler, D. W. (1994). Use of recycled wash water and returned plastic concrete in the production of fresh concrete. *Advanced cement-based materials*, 1, 267–274. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(94\)90035-3](https://doi.org/10.1016/1065-7355(94)90035-3)
- Bueno, E. T., Paris, J. M., Clavier, K. A., Spreadbury, C., Ferraro, C. C., & Townsend, T. G. (2020). A review of ground waste glass as a supplementary cementitious material: a focus on alkali-silica reaction. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120180>
- Busch, P., Kendall, A., Murphy, C. W., & Miller, S. A. (2022). Literature review on policies to mitigate GHG emissions for cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106278. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106278>
- Camiletti, J., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2013). Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultra-high-performance concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65(5), 297–307. <https://doi.org/10.1680/mac.12.00015>
- Cebeci, O. Z., & Saatci, A. M. (1989). Domestic sewage as mixing water in concrete. *ACI Material Journal*, 86(5), 503–506. <https://doi.org/10.14359/9743>
- Celik, K., Meral, C., Gursel, A. P., Mehta, P. K., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2015). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating

- concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 56, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003>.
- Chen, C. H., Huang, R., Wu, J. K., & Yang, C. C. (2006). Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.010>
- Choi, S. Y., Choi, Y. S., & Yang, E.I. (2017). Effects of heavy weight waste glass recycled as fine aggregate on the mechanical properties of mortar specimens. *Annals of Nuclear Energy*, 99, 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.09.035>
- Cong, P., Du, R., Gao, H., & Chen, Z. (2024). Comparison and assessment of carbon dioxide emissions between alkali-activated materials and OPC cement concrete. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 11, 918–938. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.07.011>.
- Corinaldesi, V. (2012). Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 36, 758–764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.129>
- Correia, S. L., Souza, F. L., Dienstmann, G., & Segadaes, A. M. (2009). Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments. *Waste Management*, 29, 2886–2891. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.014>
- de Castro, S., & de Brito, J. (2013). Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 41, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.021>
- De Larrard, F., & Sedran, T. (1994). Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 24, 997–1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- de Moura, J. M. B. M., Pinheiro, I. G., Aguado, A., & Rohden, A.B. (2021). Sustainable pervious concrete containing glass powder waste: performance and modelling. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128213>
- Demir Sahin, D. (2024). Evaluation of cherts in Ggumushane province in terms of alkali silica reaction. *Buildings*, 14(4), 873. <https://doi.org/10.3390/buildings14040873>
- DeRousseau, M. A., Arehart, J. H., Kasprzyk, J. R., & Srubar, W. V. (2020). Statistical variation in the embodied carbon of concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123088. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123088>
- Diaz-Loya, I., Juenger, M., Seraj, S., & Minkara, R. (2019). Extending supplementary cementitious material resources: reclaimed and remediated fly ash and natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 101, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.011>

- Diedrich, P., Mouret, M., de Ryck, A., Ponchon, F., & Escadeillas G. (2012). The nature of limestone filler and self-consolidating feasibility – Relationships between physical, chemical and mineralogical properties of fillers and the flow at different states, from powder to cement-based suspension. *Powder Technology*, 218(5), 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.11.045>
- Dyer, T. D., & Dhir, R. K. (2001). Chemical reactions of glass cullet used as cement component. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(6), 412–417. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:6\(412\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:6(412))
- Djamaluddin, A., Caronge, M., Tjaronge, M. W., Tabran Lando, A., & Irmawaty, R. (2019). Evaluation of sustainable concrete paving blocks incorporating processed waste tea ash. *Case Studies in Construction Material*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00325>
- Doo-Yeol, Y., Yujin, L., Ilhwan, Y., Nemkumar, B., & Gxoangsep, Z. (2022). Utilization of liquid crystal display (LCD) glass waste in concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 130, 104542. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104542>
- Dransfield, J. (2003). Admixtures for concrete, mortar and grout. *Advanced Concrete Technology*, 3, 3–36. <https://doi.org/10.1016/B978-075065686-3/50280-9>
- Du, H., & Tan, K. H. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods. *Cement and Concrete Composites*, 35, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.029>
- ERMCO – European Ready Mixed Concrete Organization. (2019). *Ready-Mixed Concrete Industry Statistics: Year 2018*. ERMCO – European Ready Mixed Concrete Organization.
- Fanijo, E. O., Kassem, E., & Ibrahim, A. (2021). ASR mitigation using binary and ternary blends with waste glass powder. *Construction and Building Materials*, 280, 122425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122425>
- Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., Lokuge, W., Aravinthan, T., & Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – a review on global waste generation, performance, application and future opportunities. *Resources Conservation and Recycling*, 173, 105745. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105745>
- Ferrari, G., Miyamoto, M., & Ferrari, A. (2014). New sustainable technology for recycling returned concrete. *Construction and Building Materials*, 67, 353–359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.008>
- Ferriz-Papí, J.A. (2014). Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants. *Materiales de Construcción*, 64(313), 1–9. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.00113>
- Gettu, R., Roncero, J., & Martin, M. A. (2002). Study of the behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures subjected to long-term drying. In P. Balaguru, A. Naman, & W. Weiss (Eds.), *Concrete: Material science to application – A tribute to Surendra P. Shah*, SP-206, 157–166. American Concrete Institute.

- Ghrici, M., Kenai, S., & Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 542–549. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009>
- Gillott, J. E., Duncan, M., & Swenson, E. G. (1973). Alkali-aggregate reaction in nova Scotia IV. Character of the reaction. *Cement and Concrete Research*, 3(5), 521–535. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90091-4)
- Gowtham, R., Prabhu, S. M., Gowtham, M., & Ramasubramani R. (2021). A review on utilization of waste glass in construction field. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1130(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1757899X/1130/1/012010>
- Gray, D. L. (2019). Decrease in fly ash spurring innovation within construction materials industry. *Natural Gas & Electricity*, 35(6), 23–29. <https://doi.org/10.1002/gas.22099>
- Gribniak, V., Kaklauskas, G., Torres, L., Daniunas, A., Timinskas, E., & Gudonis, E. (2013). Comparative analysis of deformations and tension-stiffening in concrete beams reinforced with GFRP or steel bars and fibers. *Composites Part B: Engineering*, 50, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.003>
- Guo, P., Weng, W., Nassif, H., Gou, H., & Bao, Y. (2020). New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, 257, 119579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>
- Hay, R., & Ostertag, C. P. (2021). New insights into the role of fly ash in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete. *Cement and Concrete Research*, 144, 106440. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106440>
- Hamada, H., Alattar, A., Tayeh, B., Yahaya, F., & Thomas, B. (2022). Effect of recycled waste glass on the properties of high-performance concrete: a critical review. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01149. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01149>
- Hanif, A., Kim, Y., Lee, K., Park, C., & Sim, J. (2017). Influence of cement and aggregate type on steam-cured concrete—An experimental study. *Magazine of Concrete Research*, 69, 694–702. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00015>
- Harbec, D., Zidol, A., Tagnit-Hamou, A., & Gitzhofer, F. (2017). Mechanical and durability properties of high performance glass fume concrete and mortars. *Construction and Building Materials*, 134, 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.018>
- Hasanuzzaman, M., Rafferty, A., Sajjia, M., & Olabi A. G. (2016). Properties of glass materials. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03998-9>

- Ho, H.-J., Iizuka, A., & Shibata, E. (2020). Chemical recycling and use of various types of concrete waste: a review. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124785. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124785>
- Hossain, Md. U., Cai, R., Ng, S. T., Xuan, D., & Ye, H. (2021). Sustainable natural pozzolana concrete – a comparative study on its environmental performance against concretes with other industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 270, 121429. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121429>
- Huang, X., Huang, J., & Kaewunruen, S. (2025). An explainable machine learning system for efficient use of waste glasses in durable concrete to maximise carbon credits towards net zero emissions. *Waste Management*, 193, 539–550. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.12.034>
- Guifeng Yan, G.Z. W., Wu, J., Zhang, Y., & Pan, Z. (2021). Study on basic properties of concrete with waste glass powder replacing part of cementitious materials. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 5(2), pp. 118–119.
- Yavuz, D., Akbulut, Z. F., & Guler, S. (2024). An experimental investigation of hydraulic and early and later-age mechanical properties of eco friendly porous concrete containing waste glass powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, 418, 135312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135312>
- Ibrahim, K. I. M. (2020). Recycled Waste Glass [WG] in Concrete. *Global Journal of Engineering Sciences*, 6(1), 6–13. <https://doi.org/10.33552/GJES.2020.06.000627>
- Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International journal of sustainable built environment*, 1(2), 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>
- Islam, G. M. S., Rahman, M. H., & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 37–44. <https://doi.org/10.1016/J.IJSBE.2016.10.005>
- Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2009). Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 29, 655–659. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012>
- Yu, X., Zhong, T., Song, T. Y., & Pan, Z. (2016). Performance of concrete made with steel slag and waste glass. *Construction and Building Materials*, 114, 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.217>
- Jannat, N., Al-Mufti, R. L., Hussien, A., Abdullah, B., & Cotgrave, A. (2022). Influences of agro- wastes on the physico-mechanical and durability properties of unfired clay blocks. *Construction and Building Materials*, 318, 126011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126011>
- Jaroenratanapirom, D., & Sahamitmongkol, R. (2011). Self-crack closing ability of mortar with different additives. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 21(1), 9–17. <https://jmmm.material.chula.ac.th/index.php/jmmm/article/view/163>

- Jesus, S., Maia, C., Farinha, C. B., de Brito, J., & Veiga, R. (2019). Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 229, 116844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116844>
- Jiang, C., Zhao, W., Li, L., Qin, Y., & Lu, L. (2024). Influence of silica fume on pore structure, mechanical properties and carbon emission of reactive powder concrete prepared by ice crystal homogenization technology. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03972. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03972>
- Jiang, X., Xiao, R., Bai, Y., Huang, B., & Ma, Y. (2022). Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130778. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130778>
- Jin, W., Meyer, C., & Baxter, S. (2000). Glascrete' – concrete with glass aggregate. *ACI Structural Journal*, 97(2), 208–213. <https://doi.org/10.14359/825>
- Jubeh, A. I., Al Saffar, D. M., & Tayeh, B. A. (2019). Effect of recycled glass powder on properties of cementitious materials contains styrene butadiene rubber. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 39. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4212-0>
- Kamali, M., & Ghahremaninezhad, A. (2016). An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders. *Construction and Building Materials*, 112, 915–924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.085>
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y. F., Hanif, A., & Patnaikuni, I. (2018). Thermal performance evaluation of eco-friendly bricks incorporating waste glass sludge. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1867–1880. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.255>
- Khan, M. N. N., Saha, A. K., & Sarker, P. K. (2020). Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: a review. *Journal of Building Engineering*, 28, 101052. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101052>
- Kim, J., Yi, C., & Zi, G. (2015). Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. *Construction and Building Materials*, 75, 242–246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.007>
- Kim, J., Moon, J. H., Shim, J. W., Sim, J., Lee, H. G., & Zi, G. (2014). Durability properties of concretes with waste glass sludge exposed to freeze-and-thaw condition and de-icing salt. *Construction and Building Materials*, 66(7), 398–402. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.081>
- Kou, S., & Poon, C. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 31, 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.002>

- Krajnović, I., Komkova, A., Barragán, B., Tardy, G., Bos, L., & Matthys S. (2024). Explorative Study into Alkali-Activated Repair Mortars Using Blast Furnace Slag and Glass Waste. *Sustainability*, 16, 764. <https://doi.org/10.3390/su16020764>
- Lee, G., Ling, T. C., Wong, Y. L., & Poon, C. S. (2011). Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2611–2618. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.008>
- Lee, G., Poon, C. S., Wong, Y. L., & Ling, T. C. (2013). Effects of recycled fine glass aggregates on the properties of dry-mixed concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 38, 638–643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.017>
- Lee, H., Hanif, A., Usman, M., Sim, J., & Oh, H. (2018). Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. *Journal of Cleaner Production*, 170, 683–693. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.133>
- Li, A., Qiao, H., Li, Q., Hakuzweyezu, T., & Chen, B. (2021). Study on the performance of pervious concrete mixed with waste glass powder. *Construction and Building Materials*, 300, 123997. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123997>
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (1997). *Aktyviosios paviršiaus medžiagos. Vandenių tirpalų pH nustatymas. Potenciometrinis metodas* (LST ISO 4316:1997).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2005). *Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant grąžinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti* (LST EN 1008:2005).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2016). *Sukietėjusio betono bandymai. 9 dalis. Atsparumas cikliškam užšalimui ir atitirpimui, kai naudojamos ledą tirpinančios druskos. Atskilinėjimas* (CEN/TS 12390-9:2016).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2019). *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris* (LST EN 12390-3:2019).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2019). *Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis* (LST EN 12390-7:2019).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2022). *Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai* (LST EN 12350-7:2019/AC:2022).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2024). *Betonas. Bandymo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūrinio užšaldymo ir atšildymo metodu* (LST 1428-17:2024).
- Limbachiya, M. C. (2009). Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 1078–1083. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.022>

- Lindgard, J., Nixon, P. J., Borchers, I., Schouenborg, B., Wigum, B. J., Haugen, M., & Akesson, U. (2010). The EU “PARTNER” Project – European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 611–635. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.004>
- Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., & Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 38, 848–860. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>
- Louise, K. T., & Frank, G. C. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- Low, G. L., Ky, N., Ngeow, W. C. C. W. L. Wl, N., Tam, C. T., & Heng, R. B. W. (2007). Use of recycled cement-based slurry water for making concrete. *Journal of the Institution of Engineers, Malaysia*, 68(4), 47–55.
- Lu, J. X., Yan, X., He, P., & Poon, C. S. (2019). Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1102–1112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.260>
- Lu, J. X., Shen, P., Zhang, Y., Zheng, H., Sun, Y., & Poon, C. S. (2021). Early-age and microstructural properties of glass powder blended cement paste: Improvement by seawater. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104165. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104165>
- Ma, Q., Mao, Z., Lei, M., Zhang, J., Luo, Z., Li, S., Du, G., & Li, Y. (2023). Experimental investigation of concrete prepared with waste rubber and waste glass. *Ceramics International*, 49, 16951–16970. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.058>
- Maage, M. (1984). Frost Resistance and Pore Size Distribution in Bricks. *Matériaux et Construction*, 17, 345–350. <https://doi.org/10.1007/BF02478706>
- Maia, L., Figueiras, F., Nunes, S., Azenha, M., & Figueiras, F. (2012). Influence of shrinkage reducing admixtures on distinct SCC mix compositions. *Construction and Building Materials*, 35, 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.033>
- Mao, Z., Zhang, J., Luo, Z., Ma, Q., Duan, Y., Li, S., & Miao, Y. (2021). Behavior evaluation of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete after elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 306, 124917. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124917>
- Matos, A. M., & Sousa Coutinho, J. (2016). Waste glass powder in cement: macro and micro scale study. *Advances in Cement Research*, 28, 423–432. <https://doi.org/10.1680/jadcr.14.00025>
- Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2012). Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 36, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>

- Meddah, M. S., Suzuki, M., & Sato, R. (2011). Influence of a combination of expansive and shrinkage-reducing admixture on autogenous deformation and self-stress of silica fume high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.033>
- Mehta, P. K. (1994). Concrete technology at the crossroads—problems and opportunities. *ACISpecial Publication – Symposium Publication*, 144, 1–30. <https://doi.org/10.14359/4530>
- Meyer, C., & Xi, Y. (1999). Use of recycled glass and fly ash for precast concrete. *The Journal of Materials in Civil Engineering*, 11, 89–90. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:2\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:2(89))
- Metwally, I. M. (2007). Investigations on the performance of concrete made with blended finely milled waste glass. *Advances in Structural Engineering*, 10(1), 47–53. <https://doi.org/10.1260/136943307780150823>
- Mi, R., Wang, Y., Yu, T., & Li, W. (2023). Effects of carbon-sequestering coral aggregate on pore structures and compressive strength of concrete. *Low-carbon Materials and Green Construction*, 1(21). <https://doi.org/10.1007/s44242-023-00021-z>
- Mohammed, M. K., Dawson, A. R., & Thom, N. H. (2014). Macro/micro-pore structure characteristics and the chloride penetration of self-compacting concrete incorporating different types of filler and mineral admixture. *Construction and Building Materials*, 72, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.070>
- Monteagudo, S. M., Moragues, A., Gálvez, J. C., Casati, M. J., & Reyes, E. (2014). The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis morphological evolution of the solid phases. *Thermochimica Acta*, 592, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.08.008>
- Musikant, S. (2003). Glass. *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, 781–806. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00292-1>
- Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., & Mustapha, K. N. (2015). Performance of Bricks Made Using Fly Ash and Bottom Ash. *Construction and Building Materials*, 96, 576–580. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.068>
- Nagrockienė, D., Pundienė, I., Kanapeckienė, L., & Jarmolajeva, E. (2023). The impact of high-alkali biofuel fly ash on the sustainability parameters of concrete. *Buildings*, 13, 3015. <https://doi.org/10.3390/buildings13123015>
- Nguyen, V. T., Lee, S. Y., Chung, S.-Y., Moon, J.-H., & Kim, D. J. (2021). Effects of cement particle distribution on the hydration process of cement paste in three-dimensional computer simulation. *Construction and Building Materials*, 311, 125322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125322>
- Nicoleau, L., & Nonat, A. (2016). A new view on the kinetics of tricalcium silicate hydration. *Cement Concrete Research*, 86, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.04.009>

- Nunes, S., Matos, A. M., Duarte, T., Figueiras, H., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Mixture design of self-compacting glass mortar. *Cement and Concrete Composites*, *43*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2013.05.009>
- Ogundipe, O. M., & Nnochiri, E. S. (2020). Evaluation of the effects of waste glass in asphalt concrete using the Mmarshall test. *Engineering Review*, *40*(2), 24–33. <https://doi.org/10.30765/er.40.2.04>
- Oliveira, d.S., Aline, O., da Fonseca, M. G., Ferrara, L., de Moraes, R. F., E., & Toledo F. R. D. (2021). An overview of a twofold effect of crystalline admixtures in cement-based materials: from permeability-reducers to self-healing stimulators. *Journal of Building Engineering*, *41*, 102400. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102400>
- Oliveira, J. M., Ribeiro, A. B., & White, F. G. (2014). Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, *52*, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.033>
- Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., DeFord, H. D., & Townsend, T. G. (2016). A review of waste products utilized as supplements to portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, *121*, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>
- Park, S. B., & Lee, B. C. (2004). Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. *Cement and Concrete Research*, *34*(7), 1145–1152. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.005>
- Park, S. B., Lee, B. C., & Kim, J. H. (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research*, *34*, 2181–2189. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.006>
- Pascual, A. B., Tognonvi, T. M., & Tagnit-Hamou, A. (2021). Optimization study of waste glass powder-based alkali activated materials incorporating metakaolin: activation and curing conditions. *Journal of Cleaner Production*, *308*, 127435. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127435>
- Pazderka, J., & Hajkova, E. (2016). Crystalline admixture and their effect on selected properties of concrete. *Acta Polytechnica*, *56*(4), 306–311. <https://doi.org/10.14311/AP.2016.56.0306>
- Pezechki, Z., Soleimani, A., Darabi, A., & Mazinani, S. (2018). Thermal transport in: building materials. *Construction and Building Materials*, *181*, 238–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.230>
- Pham, N. P., Toumi, A., & Turatsinze, A. (2018). Rubber aggregate-cement matrix bond enhancement: microstructural analysis, effect on transfer properties and on mechanical behaviours of the composite. *Cement and Concrete Composites*, *94*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.005>
- Pintori, G., & Cattaruzza, E. (2022). XPS/ESCA on glass surfaces: a useful tool for ancient and modern materials. *Optical Materials: X*, *13*, 100108. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2021.100108>

- Prata, J. E., & Simões-Moreira, J. R. (2019). Water recovery potential from flue gases from natural gas and coal-fired thermal power plants: A Brazilian case study. *Energy*, *186*, 115780. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.110>
- Prathebas, G. M., Ishwariya, A. M., Jayasri, A., & Kalaiyarasi, R. (2018). An experimental study on waste glass as partial replacement for fine aggregate in concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, *5*, 850–854. <https://www.irjet.net/archives/V5/i3/IRJET-V5I3192.pdf>
- Qaidi, S., Najm, H. M., Abed, S. M., Özkılıç, Y. O., Al Dughaiishi, H., Alost, M., Sabri, M. M. S., Alkhatib, F., & Milad, A. (2022). Concrete Containing Waste Glass as an Environmentally Friendly Aggregate: A Review on Fresh and Mechanical Characteristics. *Materials*, *15*, 6222. <https://doi.org/10.3390/ma15186222>
- Qu, F., Li, W., Dong, W., Tam, V. W. Y., & Yu, T. (2021). Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review. *Journal of Building Engineering*, *35*, 102074. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102074>
- Rashad, A. M. (2014). Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement. *Construction and Building Materials*, *72*, 340–357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.092>
- Rashidian-Dezfouli, H., Afshinnia, K., & Rangaraju, P.R. (2018). Efficiency of ground glass fiber as a cementitious material, in mitigation of alkali-silica reaction of glass aggregates in mortars and concrete. *Journal of Building Engineering*, *15*, 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.018>
- Rathnayake, M., Julnipitawong, P., Tangtermsirikul, S., & Toochinda, P. (2018). Utilization of coal fly ash and bottom ash as solid sorbents for sulfur dioxide reduction from coal fired power plant: life cycle assessment and applications. *Journal of Cleaner Production*, *202*, 934–945. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.204>
- Rattanachu, P., Toolkasikorn, P., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P., & Jaturapitakkul, C. (2020). Performance of recycled aggregate concrete with rice husk ash as cement binder. *Cement and Concrete Composites*, *108*, 103533. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103533>
- Reiterman, P., Mondschein, P., Doušova, B., Davidova, V., & Keppert, M. (2022). Utilization of concrete slurry waste for soil stabilization. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e00900. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00900>
- Rughooputh, R., Rana, J. O., & Joorawon, K. (2017). Possibility of using fresh concrete waste in concrete for non-structural civil engineering works as a waste management strategy. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *21*, 94–99. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0052-1>
- Sabau, M., Bompa, D. V., & Silva, L. F. O. (2021). Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: environmental influence of cement content. *Geoscience Frontiers*, *12*, 101235.

- <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101235>
- Sabbrojjaman, M., Liu, Y., Tafsirojjaman, T. (2024). A comparative review on the utilisation of recycled waste glass, ceramic and rubber as fine aggregate on high performance concrete: mechanical and durability properties. *Developments in the Built Environment*, 17, 100371. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100371>
- Saint-Pierre, F., Rivard, P., & Ballivy, G. (2007). Measurement of alkali-silica reaction progression bu ultrasonic waves attenuation. *Cement and Concrete Research*, 37, 948–956. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.022>
- Sakai, E., Miyahara, S., Ohsawa, S., Lee, S., & Daimon, M. (2005). Hydration of fly ash cement. *Cement and Concrete Research*, 35, 1135–1140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.008>
- Sathipan, N., & Subraminiam, D. N. (2024). Potential use of crushed waste glass and glass powder in sustainable pervious concrete: A review. *Cleaner Waste Systems*, 9, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100191>
- Schafer, M. L., Clavier, K. A., Townsend, T. G., Ferraro, C. C., Paris, J. M., & Watts, B. E. (2019). Use of coal fly ash or glass pozzolan addition as a mitigation tool for alkali-silica reactivity in cement mortars amended with recycled municipal solid waste incinerator bottom ash. *Waste and Biomass Valorization*, 10(9), 2733–2744. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0296-8>
- Schoon, J., Buysser, K. D., Driessche, I. V., & Belie, N. D. (2015). Feasibility Study of the use of concrete sludge as alternative raw material for portland clinker production. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001230](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001230)
- Schwarz, N., Cam, H., & Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30, 486–496. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2008.02.001>
- Serifou, M., Sbartaï, Z. M., Yotte, S., Boffoue, M. O., Emeruwa, E., & Bos, F. (2013). A study of concrete made with fine and coarse aggregates recycled from fresh concrete waste. *Journal of Construction Engineering*, 2013, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2013/317182>
- Serpa, D., Santos Silva, A., de Brito, J., Pontes, J., & Soares, D. (2013). ASR of mortars containing glass. *Construction and Building Materials*, 47, 489–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.058>
- Shayan, A., & Xu, A. (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 81–89. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5)
- Shayan, A., & Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: a field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 457–468. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>

- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30, 91–100. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6)
- Shi, C., & Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 234–247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., & Wang, H., (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 987–993. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015>
- Shi, M., Ling, T., Gan, B., & Guo, M. (2019). Turning concrete waste powder into carbonated artificial aggregates. *Construction and Building Materials*, 199, 178–184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.021>
- Sinkhonde, D., & Bezabih, T. (2024). On the computational evaluation of carbon dioxide emissions of concrete mixes incorporating waste materials: a strength- based approach. *Cleaner Waste Systems*, 8, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100149>
- Standardization Administration of the People's Republic of China. (2019). *Standard for building carbon emission calculation* (GB/T 51366-2019). China Architecture & Building Press.
- Taha, B., & Nounu, G. (2008). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 22(5), 713–720. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>
- Tam, V. W. Y., & Tam, C. M. (2007). Economic comparison of recycling over-ordered fresh concrete: a case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 208– 218. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.005>
- Tamanna, N., Tuladhar, R., & Sivakugan, N. (2020). Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>
- Tan, K. H., & Du, H. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: part I–fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites*, 35, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028>
- Tariq, A., & Yanful, E. K. (2013). A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices. *Journal of Environmental Management*, 131, 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.039>
- Thomas, B. S. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3913–3923. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>
- Thorne, J., Bompa, D. V., Funari, M. F., & Garcia-Troncoso, N. (2024). Environmental impact evaluation of low-carbon concrete incorporating fly ash and limestone. *Cleaner Materials*, 12, 100242. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100242>

- Tibbetts, C. M., Riding, K. A., & Ferraro, C. C. (2021). A critical review of the testing and benefits of permeability-reducing admixtures for use in concrete. *Cement*, 6, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2021.100016>
- Tucker, E. L., Ferraro, C. C., Laux, S. J., & Townsend, T. G. (2018). Economic and life cycle assessment of recycling municipal glass as a pozzolan in portland cement concrete production. *Resources Conservation and Recycling*, 129, 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.025>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2018). *Advancing sustainable materials management: 2015 fact sheet*. U.S. Environmental Protection Agency. epa.gov
- Uchikawa, H., & Hanehara, S. (1997). Recycling of Waste as an Alternative Raw Material and Fuel in Cement Manufacturing. *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing. 1st edition, Noyes Publications, United States of America*, 430–551. <https://doi.org/10.1016/B978-081551393-3.50011-9>
- Vasan, S. K. (2024). Properties of concrete with waste glass powder (GP) as fine aggregate replacement. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8, 2308–2314. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1258.0982S1119>
- Vegas, I., Cano, M., Arribas, I., Frías, M., & Rodríguez, O. (2015). Physical–mechanical behavior of binary cement blended with thermally activated coal mining waste. *Construction and Building Materials*, 99(30), 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.189>
- Vektaris, B., & Vilkas, V. (2006). *Betono tvarumas: Betono sulfatinė ir šarminė korozija, atsparumas šalčiui ir karbonizacijai, tyrimai ir prevencinės priemonės*. Technologija.
- Vieira, L. B. P., & Figueiredo, A. D. (2016). Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants. *Waste Management*, 56, 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.015>
- Wang, H. Y., & Huang, W. L. (2010). Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass. *Construction and Building Materials*, 24, 1008–1013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.018>
- Wang, Y., Liao, J., & Liu, Z. (2023). Service life prediction and environmental impact evaluation of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 395, 132270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132270>
- Wang, J., Che, Z., Zhang, K., Fan, Y., Niu, D., & Guan, X. (2023). Performance of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials (fly ash, GBFS, silica fume, and metakaolin): mechanical properties, pore structure, and water absorption. *Construction and Building Materials*, 368, 130455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130455>
- Wang, K., Jansen, D., Shah, S. P., & Karr, A. (1997). Permeability study of cracked concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(3), 381–393. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00031-8)

- Wang, T. M. (2007). *Control of cracking in engineering structure*. China Architecture & Building Press.
- Wang, X., Fang, C., Li, D., Han, N., & Xing, F. (2018). A self-healing cementitious composite with mineral admixtures and built-in carbonate. *Cement and Concrete Composites*, 92, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.013>
- Wright, J. R., Cartwright, C., Fura, D., & Rajabipour, F. (2013). Fresh and hardened properties of concrete incorporating recycled glass as 100% sand replacement. *The Journal of Materials in Civil Engineering*, 26, 04014073. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000979](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000979)
- Wu, D., Mao, Z., Zhang, J., Li, S., & Ma, Q. (2023). Performance evaluation of concrete with waste glass after elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 368, 130486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130486>
- Xuan, D., Zhan, B., Poon, C. S., & Zheng, W. (2016). Carbon dioxide sequestration of concrete slurry waste and its valorisation in construction products. *Construction and Building Materials*, 113, 664–672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.109>
- Zhang, C., Guan, X., Li, J., Li, Y., & Lu, R. (2023). Coupling effect of cementitious capillary crystalline waterproof material and exposure environments on self-healing properties of engineered cementitious composites (ECC). *Journal of Building Engineering*, 63, 105471. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105471>
- Zhang, J. X., & Fujiwara, T. (2007). Concrete sludge powder for soil stabilization. *Transportation Research Record*, 2026, 54–59. <https://doi.org/10.3141/2026-07>
- Zhang, W., Pi, Y., Kong, W., Zhang, Y., Wu, P., Zeng, W., & Yang, F. (2020). Influence of damage degree on the degradation of concrete under freezing-thawing cycles. *Construction and Building Materials*, 260, 119903. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119903>
- Zhao, Y., Wang, T., & Yi, W. (2023). Enenergy-accounting-based comparison of carbon emissions of solid waste recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 387, 131674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131674>
- Zidol, A., Tognonvi, M. T., & Tagnit-Hamou, A. (2017). Effect of glass powder on concrete sustainability. *New Journal of Glass and Ceramics*, 7(2), 34–47. <https://doi.org/10.4236/njgc.2017.72004>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

- Nagročkienė, D., Pundienė, I., Čepulis, A. & Pocius, E. (2021). The effect of crystallizing admixture on the properties and shrinkage of concrete. *Ceramics-Silikaty*, 65(3), 273–280. <https://doi.org/10.13168/cs.2021.0028>
- Pocius, E., Nagročkienė, D. & Pundienė, I. (2023). The influence of concrete sludge from residual concrete on fresh and hardened cement paste properties. *Materials: Special issue: Concretes and cement-based composites: additives/admixtures, hydration process and durability research*, 16(6), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma16062531>
- Pocius, E., & Nagročkienė, D. (2023). The effect of waste glass sludge used as cement replacement and crystallising admixture on the properties of hardened cement paste. *Ceramics-Silikaty*, 67(2), 227–234. <https://doi.org/10.13168/cs.2023.0021>
- Pocius, E., Nagročkienė, D. & Jarmolajeva, E. (2024). The impact of glass and concrete sludge amounts on the properties of sustainable concrete with crystallizing admixture. *Ceramics-Silikaty*, 68(3), 328–341. <https://doi.org/10.13168/cs.2024.0032>
- Pocius, E., Nagročkienė, D. & Pundienė, I. (2025). Influence of glass processing waste quantities on the freeze-thaw resistance of sustainable. *Ceramic-Silikaty*, 69(2), 308–320. <https://doi.org/10.13168/cs.2025.0015>

Straipsniai kituose leidiniuose

- Pocius, E., ir Čepulis, A. (2022). Betono su kristalizuojančiąja įmaiša fizikinių ir mechaninių savybių tyrimai. *Mokslas – Lietuvos ateitis. Statybos inžinerija*, 14, 1–6. <https://doi.org/10.3846/mla.2022.15188>
- Pocius, E. & Nagrockienė, D. (2022). Influence of dried concrete sludge on the properties of hardened cement paste. In *Proceedings of the 5th International Conference on Modern Research in Engineering, Technology and Science (ICMETS)* (pp. 149–157). <https://www.dpublication.com/wp-content/uploads/2022/02/15-9335.pdf>
- Pocius, E., Nagrockienė, D., Pundienė, I. & Girnienė, I. (2024). Effect of glass processing waste content on concrete properties. In J. A. O. Barros, G. Kaklauskas, & E. K. Zavadskas (Eds.), *Modern Building Materials, Structures and Techniques. MBMST 2023. Lecture Notes in Civil Engineering* (p. 339-348). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_34

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Residential and infrastructure construction is undergoing intensive development in Lithuania. As production volumes grow, the amount of waste generated during material manufacturing and construction processes also increases. One type of such waste occurs when surplus concrete is returned from construction sites or when truck mixers are washed after a working day. It is estimated that, on average, a nine-cubic-meter truck mixer returns about 200–400 kg of waste to concrete batching plants daily. A portion of this waste is not reused in concrete production and is difficult to dispose of. This waste consists of concrete sludge, which accumulates in landfills, and contaminated water, which requires additional treatment and purification. Another waste product suitable for concrete production comes from the glass industry. Glass processing waste is generated during the processing of glass sheets. This waste contains high levels of silicon dioxide, making it potentially pozzolanically active and capable of promoting cement hydration. To date, glass processing waste is not utilised and ends up in landfills. For these reasons, the utilisation of concrete sludge and glass processing waste – transforming them into useful components within concrete mixtures and thus reducing landfill accumulation – is a relevant issue both for Lithuania and globally.

To conserve non-renewable natural resources, i.e., the amounts of cement and aggregates used in concrete production, and to develop concrete from components with a lower

environmental impact, it is essential to investigate the effect of waste types and a modifying additive (crystalline additive) on concrete properties. Currently, despite their potential, concrete sludge and glass processing waste are not yet used in concrete production in Lithuania. However, to meet the construction sector's demand for new materials aligned with circular economy principles, it is appropriate to study how these waste products affect the structure, properties, and durability of concrete.

Relevance of the dissertation

The simultaneous use of glass processing waste and concrete sludge reduces CO₂ emissions and increases concrete durability. Utilising glass processing waste can reduce the amount of cement used in concrete production, while the use of concrete sludge can decrease the demand for fine aggregates and potable water. The application of both types of waste can significantly reduce the amount of CO₂ released into the environment. By replacing a portion of the cement, the harmful environmental impact of cement production is mitigated, and the reduced use of natural mineral aggregates conserves natural resources while minimising negative ecological effects. In accordance with the European Green Deal and agreements by other international institutions, CO₂ emissions are expected to be reduced across all industries, and the construction sector is no exception.

Research object

The research object is frost-resistant and alkali-corrosion-resistant concrete, modified with a crystalline additive, in which a portion of the cement is replaced by glass processing waste, and a portion of the sand and water is replaced by concrete sludge.

Aim of the dissertation

The dissertation aims to develop and investigate frost-resistant, alkali-corrosion-resistant concrete with a crystalline additive, in which up to 20% of the cement is replaced by glass processing waste and 5% of the sand is replaced by dry concrete sludge.

Tasks of the dissertation

To achieve the goals of the work, the following tasks need to be addressed:

1. To investigate the chemical and mineralogical composition, particle density, bulk density, pozzolanic activity, and specific surface area of concrete sludge and glass processing waste;
2. To determine the influence of concrete sludge and glass processing waste on the rheological properties of cement paste, the mechanical properties of cement stone, and their microstructure;
3. To determine the effect of concrete sludge, glass processing waste, and a crystalline additive on the physical and mechanical properties, as well as the frost and alkali-corrosion resistance, of hardened concrete;
4. To select optimal amounts of concrete sludge as a sand replacement and glass processing waste as a cement replacement in the development of frost-resistant and alkali-corrosion-resistant concrete;

5. To evaluate the environmental impact of the developed frost-resistant and alkali-corrosion-resistant concrete using life cycle assessment (LCA).

Research methodology

Scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and thermal analysis methods were used to study the structure of glass processing waste, concrete sludge, crystalline additive, and cement stone. Standardised testing methods were applied to determine the density, flexural strength, compressive strength, water absorption, and frost resistance of cement stone and concrete, while alkali-corrosion tests were conducted according to the RILEM AAR-4 methodology. The environmental impact of the concrete was evaluated using life cycle assessment (LCA), covering stages from raw material extraction to the end of the production process.

Scientific novelty of the dissertation

A concrete was developed in which a portion of the cement was replaced by glass processing waste, and a portion of the sand was replaced by concrete sludge. The recommended ratio for using glass processing waste and concrete sludge in concrete mixtures was determined. Due to the interaction between glass processing waste and concrete sludge, the mixture structure densifies, the hydration process accelerates, and the yield of hydration products increases. The crystalline additive modifies the pore structure of the concrete, thereby increasing its frost resistance (number of freeze–thaw cycles). This complex effect allows for a 20% reduction in cement and a 5% reduction in fine aggregate content without compromising the mechanical properties, frost resistance, or alkali-corrosion resistance of the concrete. In the modified concrete mixture, the crystalline additive neutralises the negative impact of glass processing waste and concrete sludge on rheological properties while modifying the pore structure and shrinkage.

Practical value of the research findings

The research results can be applied in the production of concrete resistant to Lithuanian climatic conditions with a lower carbon footprint. The complex use of glass processing waste and concrete sludge in concrete production allows for reduced CO₂ emissions while enhancing key concrete characteristics – frost resistance and alkali-corrosion resistance. These factors enable the concrete market to utilise large quantities of glass processing waste and to recycle generated concrete sludge directly within concrete batching plants.

Defended statement

Glass processing waste, together with a crystallising additive, participates in the cement hydration process and alters the pore structure of the concrete through the formation of additional hydration products. This promotes the development of a denser concrete microstructure, stimulates a more active hydration process, reduces concrete shrinkage by 15%, and increases resistance to freeze–thaw cycles and alkali–silica reaction.

Approval of the research findings

Eight scientific articles have been published on the topic of the dissertation: five in scientific journals included in the Clarivate Analytics Web of Science (Pocius & Nagrockienė,

2023; Pocius et al., 2021, 2023, 2024, 2025); one in international database publication (Pocius & Čepulis, 2023); one in a conference proceedings included in the Clarivate Analytics Web of Science database's "Conference Proceedings" publications (Pocius et al., 2023); and one in a conference proceedings (Pocius & Nagrockienė, 2022).

The results of the dissertation have been presented at seven scientific conferences in Lithuania and abroad:

- At the 25th Young Researchers Conference "Science – The Future of Lithuania" (2022), presentation topic: "The Impact of Dry Concrete Sludge on the Durability of Cement Paste".
- At the 5th International Conference "Modern Research in Engineering, Technology & Science" (ICMETS 2022) in Rotterdam in 2022;
- At the 5th International Conference "Innovative Materials, Structure and Technologies" (IMST 2022) in Riga in 2022;
- At the 26th Young Researchers Conference "Science – The Future of Lithuania" in Vilnius in 2023;
- At the 7th International Conference "Non-Traditional Cement & Concrete" (NTCC 2023) in Brno in 2023;
- At the 14th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques" (MBMST 2023) in Vilnius in 2023;
- At the 27th Young Researchers Conference "Science – The Future of Lithuania" in Vilnius in 2024.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, a list of literature and sources, a list of the author's scientific publications on the dissertation topic, and a summary in English.

The work is 137 pages long, and includes 11 numbered equations, 45 figures, and 17 tables. A total of 193 literature sources were used in writing the dissertation.

1. Concrete sludge and glass processing wastes effect on concrete properties

Two main methods are explored to reduce the negative environmental impact of cement. One method is to reduce the amount of cement used in various cement composites by replacing it with pozzolanic active materials obtained as waste in other industries (Bueno et al., 2020; Rattanachu et al., 2020). Researchers have studied certain wastes, such as blast furnace slag, fly ash, glass waste, cement kiln dust, rice husk ash, metakaolin, and silica dust, for their use in cement production. It has been found that they positively affect cement properties and improve the durability of hardened cement paste against aggressive wastes (Sakai et al., 2005; Uchikawa et al., 1997; Vegas et al., 2015; Monteagudo et al., 2014; Ayub et al., 2014).

For a very long time, the most widely used pozzolanic active waste in the production of cement composites has been fly ash (Rathnayake et al., 2018). According to studies, fly ash improves the mechanical strength and durability of cement composites (Argiz et al.,

2018). Due to the positive influence of fly ash, the market became dependent on it; however, the transition to renewable energy sources (Diaz-Loya et al., 2019) has reduced the amount of fly ash produced in the market (Gray, 2019). As the supply of fly ash diminished in the market, this led to price increases to the point where it was no longer economically viable to use it in cement composites, prompting researchers to look for other pozzolanic active wastes that could be used as alternatives to fly ash (Paris et al., 2016).

Currently, various glass wastes are receiving increased attention. Glass waste is beneficial in construction materials due to its high silicon dioxide content (Pintori et al., 2022) and is often pozzolanic active. These properties suggest that using glass waste in concrete production could reduce waste volumes in landfills and lower CO₂ emissions by replacing a portion of cement with waste, thus significantly decreasing the use of natural raw materials in concrete. Various researchers (Ahmad et al., 2022; Oaidi et al., 2022; Ferdous et al., 2021; Gowtham et al., 2021) have experimented with using glass waste as fine or coarse aggregate, and powdered glass as a cement replacement.

Glass waste has also been tested as fine aggregate in cement composites, and researchers found that although mechanical strength decreases, it improves workability, durability, sulfate resistance, and volume stability (Doo-Yeol et al., 2022). Glass waste has also been tested for use as coarse aggregate in concrete production. Researchers found that replacing up to 17.5% of natural coarse aggregate with glass waste had a negligible impact on the mechanical properties of the concrete (Xin et al., 2016). Other researchers replaced natural coarse aggregate with only glass waste and found that up to 25% could be replaced effectively. Up to this limit, the strength of the samples significantly increased, but higher amounts of natural aggregate began to degrade the mechanical properties (Ibrahim, 2020).

Another type of glass waste that has been minimally studied is glass sludge. There are only a few researchers worldwide who have studied this waste. Some researchers from South Korea investigated the impact of glass sludge on the durability and frost resistance of concrete. They determined that glass sludge increases frost resistance, both with and without de-icing salts, and enhances resistance to chlorides and surface scaling (Jihwan et al., 2014). Other researchers examined the effect of glass sludge on concrete by varying the amount of cement used. It was found that glass sludge significantly improves mechanical properties, microstructure, reduces porosity, and increases frost resistance (Hyeonggi et al., 2018). The influence of glass sludge in cement paste was also studied by altering the cement content. The results obtained by these researchers also indicated that glass sludge improves mechanical properties after 28 days of curing. It was established that glass sludge can effectively reduce ASR expansion similarly to fly ash and is more reactive than the latter (Jihwan et al., 2015). Researchers have also attempted to use glass sludge in the production of ceramic bricks. Their results indicated that up to 25% of glass sludge could be used in fired ceramic bricks.

Another property being investigated concerning durability, in addition to material water absorption and resistance to aggressive ions, is the reactivity of particles in an alkaline environment. Since glass particles are amorphous silicon dioxide, they tend to react with alkaline substances, causing an increase in particle volume. This reaction is known as the alkali–silica reaction (ASR). Therefore, when using these wastes in concrete, ASR should be evaluated (Pezeshki et al., 2018). It has been observed that many factors can

influence these reactions, such as the size, quantity, and colour of glass particles, and supplementary cementitious materials (SCM) (Lu et al., 2019; Bisht et al., 2018). ASR reactions are typically prompted by a higher quantity of glass particles in concrete mixtures (Harbec et al., 2017), but these risks can also be managed in concrete compositions using supplementary cementitious materials (SCM), such as metakaolin or fly ash (Wang et al., 2010).

2. Materials used and research methods

These experiments incorporate glass-processing waste and concrete sludge to investigate their impact on concrete properties. Materials adhered to the current European standards for concrete production. Cement CEM I 42.5 R, meeting the specifications of EN 197-1, served as the primary binding agent. The aggregates for the concrete tests conformed to standard EN 12620. The fine aggregate used was sand with a 0/4 fraction, while the coarse aggregates comprised two fractions of crushed dolomite: 4/16. To ensure characteristics of both the concrete mix and hardened concrete, technological additives such as superplasticiser, air-entraining agents, and a crystallising additive were employed. The crystallising additive was used to reduce water absorption, extend service life, and seal cracks up to 0.4 mm. All the additives adhered to EN 934-2 standards.

Concrete sludge, obtained by washing concrete mixtures and separating wash water from coarse aggregates, was also utilised in the concrete mixtures. The dried concrete slurry functioned as a substitute for fine aggregate, while the wash water partially replaced drinking water in the mixtures.

The crystallising additive came from the German company Ha-Be Betonchemie GmbH, which is a globally recognised brand. The specific crystallising additive used was DURAHIT® Crystal Ad 2000 (DM), in powder form, also adhering to EN 934-2.

To minimise cement usage, glass sludge, which emerges during glass product processing, was incorporated. This waste is collected using special equipment that separates fine glass particles from technological water through flocculants and cyclones, followed by sedimentation, resulting in glass sludge.

The formulations utilised in the experiments are detailed in Table S2.1. Seven distinct sample batches were prepared, with the first batch functioning as the control. In all formulations, 5% of the sand was replaced with dried concrete sludge, and 10% of the drinking water was substituted with wet concrete sludge. Each batch included a consistent amount of crystallising additive, set at 1% of the cement weight. The proportion of glass sludge in the various batches was increased, while the replaced cement content varied at 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30%. A uniform water-to-binder ratio (w/b) was maintained across all test mixtures.

Concrete cubes were produced from the mixtures in both plastic and metal moulds measuring 100x100x100 mm and 150x150x150 mm. The concrete mixture was compacted on a vibrating table for a duration of 20 seconds for each sample. After 12 hours of hardening in a humid environment at a temperature of 20 ± 2 °C, the samples were removed from the moulds and submerged in water at the same temperature, where they were cured for 28 days. Different sizes of concrete samples were used to meet the requirements of various standard methodologies.

Table S2.1. Variation in compressive strength following volumetric freeze–thaw cycles

Specimen series	BS0	BS5	BS10	BS15	BS20	BS25	BS30
Glass sludge, kg	0	20	40	60	80	100	120
Dry concrete sludge, kg	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5
Wet concrete sludge, kg	16	16	16	16	16	16	16
Cement, kg	400	380	360	340	320	300	280
Sand, kg	845.5	845.5	845.5	845.5	845.5	845.5	845.5
Crushed dolomite 4/16, kg	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040
Superplasticiser, kg	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Air entraining additive, kg	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Crystallising additive, kg	4	4	4	4	4	4	4
Water, kg	144	144	144	144	144	144	144
W/R	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

Other concrete properties were evaluated in accordance with the relevant standards: LST EN 12350-7 for measuring entrained air in fresh concrete, LST EN 12390-7:2019 for determining the density of hardened concrete, LST EN 12390-3:2019 for assessing compressive strength, LST 1428-17:2016 for analysing concrete frost resistance using the volume freezing and thawing method, and CEN/TS 12390-9:2016 for evaluating resistance to cyclic freezing and thawing in the presence of de-icing salts.

3. Research on the properties of concrete modified with glass processing waste and concrete sludge with crystallising additive

To assess the impact of glass sludge on the amount of entrained air in the concrete mixture, measurements of the entrained air content were taken. The results are illustrated in Figure S3.1. The findings indicate a slight increase in the amount of entrained air with higher glass sludge content in the mixtures, up to 15%. Specifically, replacing 15% of the cement with glass sludge increased the entrained air content by 10.2% compared to the control sample. As the glass sludge content increased further, the air content began to rise more sharply; in the mixture containing 30% glass sludge, the entrained air increased by nearly 47% compared to the control sample. This increase in air content is attributed to the retention of air on the surfaces of the glass particles, which prevents it from escaping from the concrete mixture (Tan et al., 2013). Additionally, a layer of calcite particles on the glass surfaces may enhance the trapping of air bubbles.

The density of the hardened concrete samples was also measured, and these density results are displayed in Figure S3.1. There is a correlation between the density and the amount of entrained air observed. As the glass sludge content increases – given that it has a lower density than cement – the overall density of the samples decreases. The density shows a slight reduction with the substitution of cement for glass sludge, specifically experiencing a decrease of 56 kg/m³ in the sample where 15% of the cement was replaced. In the sample with 30% glass sludge, the density dropped by 141 kg/m³.

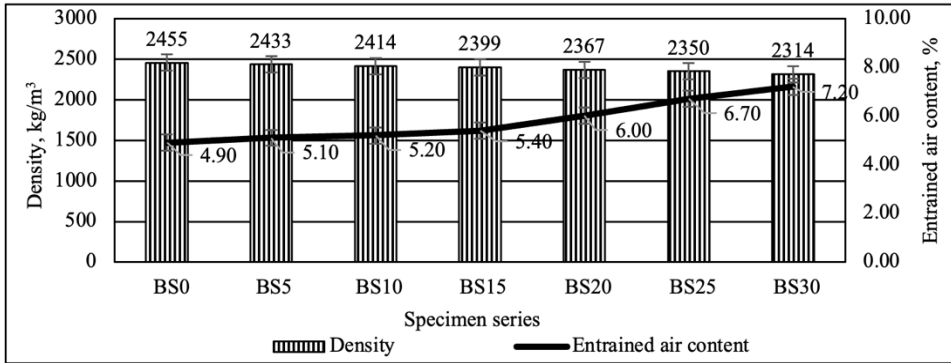


Fig. S3.1. Relationship between the density and air entrainment of concrete specimens and the quantity of glass sludge used

Water absorption is a critical property of concrete that influences its durability; thus, this study assessed water absorption levels. The results are illustrated in Figure S3.2.

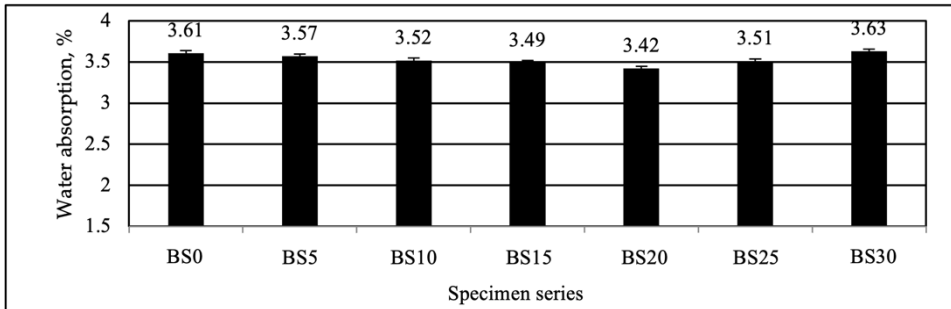


Fig. S3.2. Water absorption of different concrete mixes

The figure shows absorption values ranging from 2.42% to 2.63%. The lowest water absorption was observed in the sample where 20% of the cement was replaced with glass sludge, with this sample showing a 7.3% reduction in absorption compared to the control sample. A notable trend emerged: as the percentage of glass replacing cement increased to 20%, water absorption decreased; however, further increases in replacement began to raise the absorption levels. This phenomenon is hypothesised to occur because the sample

with 20% glass generates fewer open pores, attributed to the synergistic effect of the crystallising additive and glass. It is thought that the crystallising additive interacts with the carbonates on the surface of the glass, leading to the formation of hydration products that promote pore healing, resulting in a higher number of closed pores. When more than 20% of the cement is replaced, water absorption starts to gradually rise, likely due to an increased amount of entrained air, which limits the crystallising additive’s ability to sufficiently facilitate the formation of closed pores. An additional reason is the high pozzolanic activity of waste glass. During the hydration process, new formations are created, which fill pores. This may be the reason for the decreasing water absorption. The same tendencies were observed by researchers (Nagrockiene et al., 2023). In comparison, the sample containing 30% glass sludge exhibited slightly higher water absorption than the control sample that did not contain glass sludge.

Like other typical porous materials, concrete has an internal structure characterised by a complex network of pores. These pores play a crucial role in withstanding freeze–thaw cycles, as they facilitate water transport during freezing while also maintaining thermodynamic and pressure equilibrium within the concrete. Although high water absorption can diminish frost resistance, lowering the permeability of the internal pore network – along with reducing its connectivity and tortuosity – can help decrease water absorption (Mohammed et al., 2014). The results for the sorptivity index are shown in Figure S3.3.

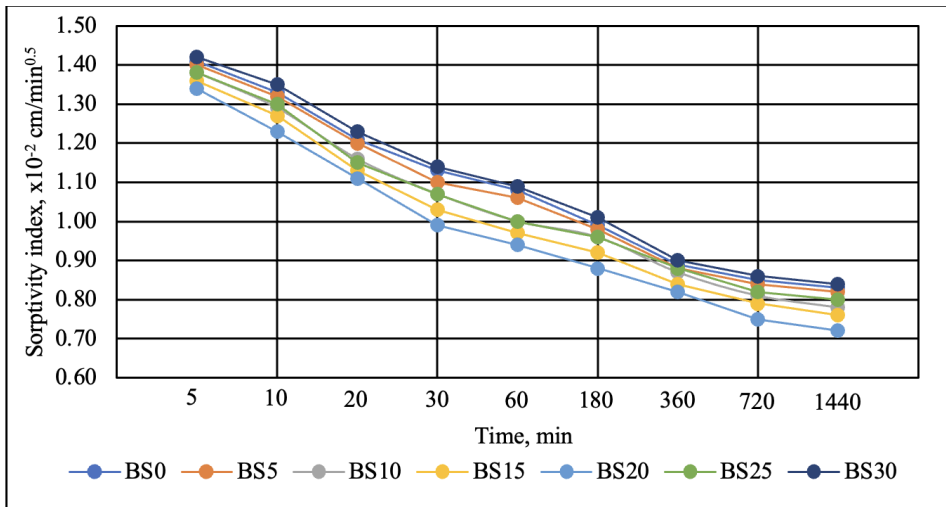


Fig. S3.3. Association between the sorptivity index and the amount of glass sludge

The findings indicate that the sorptivity index decreases when up to 20% of the cement is replaced with glass sludge. However, when more than 20% of the cement is substituted, the sorptivity index begins to rise, approaching levels like those of the control sample. This decrease in the sorptivity index can be attributed to the increased difficulty of water penetrating the internal structure through closed and gel pores, especially after fine glass particles occupy the open pores in the concrete (Pham et al., 2018), potentially

leading to the formation of additional open pores. For the sample with 20% of the cement replaced by glass sludge, the sorptivity index after 1440 minutes (or 24 hours) was measured at $0.72 \times 10^{-2} \text{ cm/min}^{0.5}$, which is 13% lower than that of the control sample. This improvement is likely due to the formation of a denser concrete structure, as the glass particles effectively fill various voids and react with the crystallising additive. This synergistic effect increases the proportion of closed pores in the internal pore structure, resulting in a more refined composition and better resistance to water permeability (Harbec et al., 2017).

To confirm the above assumption, the porosity parameters of the hardened samples were assessed, with the results shown in Figure S3.4. The results indicate that as the proportion of glass sludge replacing cement increases, both total and closed porosity rise, while open porosity only decreases up to a 20% replacement of cement with glass sludge; beyond this threshold, open porosity starts to increase.

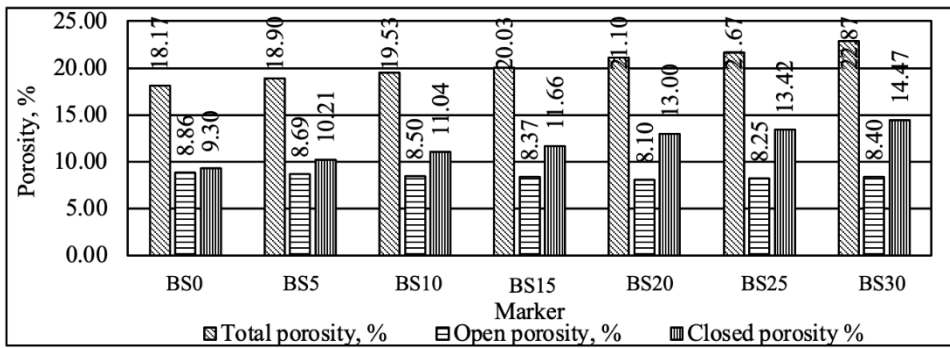


Fig. S3.4. Relationship between porosity parameters and the quantity of cement replaced to glass sludge in the concrete

When 20% glass sludge was incorporated into the mixture, closed porosity rose by approximately 55%, total porosity increased by nearly 26%, and open porosity decreased by 8.5% compared to the control sample. The rise in total porosity and open porosity can be attributed to the higher amounts of entrained air. However, the reduction in open porosity with up to 20% glass sludge replacement suggests that the crystallising additive effectively minimises open porosity while enhancing the quantity of closed pores, despite the overall increase in total porosity. Figure S3.5 further illustrate these findings, with Figure S3.5 depicting the relationship between open and closed porosity and showing the correlation between water absorption and closed porosity.

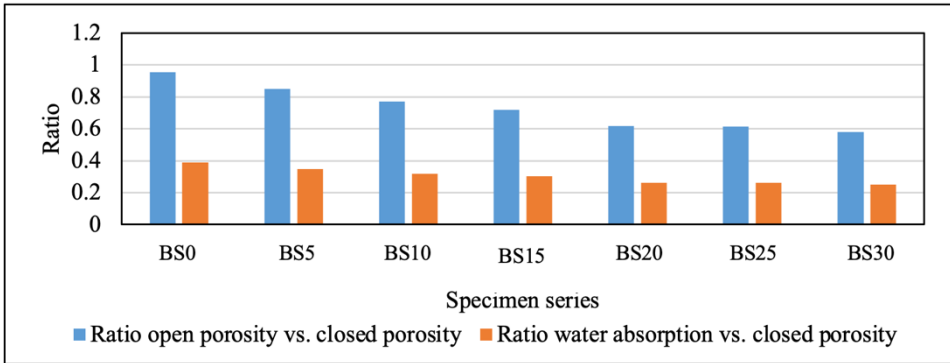


Fig. S3.5. Ratio between open and closed porosity and the ratio between water absorption and closed porosity in the concrete with different replacement of cement to glass sludge

The results indicate that when cement is replaced with up to 20 % glass sludge, the ratio between closed and open pores decreases proportionally. This confirms the hypothesis about the synergistic interaction between the carbonates present on the surface of the glass particles and the crystallising additive, whose minerals encourage the formation of new compounds between the glass and cement particles and the growth of pores. The trend presented in Figure S3.5 reflects the effect of glass content on the concrete structure; the greater number of open pores is not compensated for by the new compounds formed due to the interaction of the carbonates present on the glass particles and the crystallising additive. The number of open pores begins to dominate, and total porosity increases.

The samples were evaluated for compressive strength prior to conducting frost resistance tests using the volumetric method, as well as after 200 and 300 freeze–thaw cycles. A 3% NaCl solution was used as the immersion medium for the volumetric freezing method. The compressive strength results before and after freezing are illustrated in Figure S3.6.

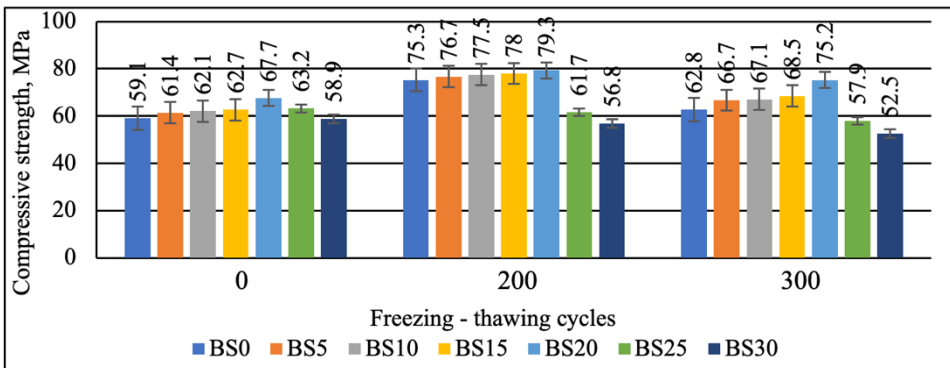


Fig. S3.6. Relationship between compressive strength and the quantity of glass sludge following volumetric freeze–thaw cycles

The data indicate that as the percentage of glass sludge in the mixture increases to 20%, the compressive strength improves; however, beyond this threshold, further increases in glass sludge led to a decline in strength. Specifically, the compressive strength of the sample with 15% of the cement replaced by glass sludge showed a 14.6% increase compared to the control sample. This enhancement can be attributed to several factors: first, the fine glass particles serve as micro-fillers, occupying voids in the concrete structure and contributing to a denser microstructure (Abbas et al., 2021). Second, there is a synergistic interaction between the glass particles and the crystallising additive, which leads to the formation of larger open pores through hydration products within the denser microstructure; a similar effect may also occur inside closed pores. And third, the pozzolanic nature of glass sludge can lead to the formation of CSH, which increases the compressive strength of concrete (Barkauskas et al., 2022).

When the cement replacement exceeds 20%, compressive strength begins to wane. The sample containing 30% glass sludge exhibited a compressive strength slightly lower than that of the control sample. This reduction is likely due to an increase in the number of open pores and overall porosity, as well as the excessive presence of fine glass particles, which weaken the bonding forces among particles within the structure due to the smoother surface of the glass particles (Vasan, 2024).

After evaluating the compressive strength following 200 and 300 freeze–thaw cycles, a similar pattern was observed in comparison to the control samples. In samples where up to 20% of the cement was substituted with glass powder, no reduction in strength was detected after either 200 or 300 cycles. Conversely, in samples containing more than 20% glass, a significant decrease in strength was noted after the freeze–thaw cycles. This decline may be attributed to the high porosity, which can result in increased damage and cracking. Such porosity levels considerably diminish the samples' resistance to the effects of these cycles. The changes in strength following 200 and 300 freeze–thaw cycles are detailed in Table S3.1.

Table S3.1. Variation in compressive strength following volumetric freeze–thaw cycles

Specimen series	Alteration in compressive strength following 200 cycles, %	Alteration in compressive strength following 300 cycles, %
BS0	27.4	6.3
BS5	24.9	8.6
BS10	24.8	8.1
BS15	21.1	9.3
BS20	17.1	11.1
BS25	-2.8	-8.4
BS30	-3.6	-10.8

SEM analyses were performed on specimens before and after freezing tests. Photographs of the hardened concrete specimens are shown in Figure S3.7.

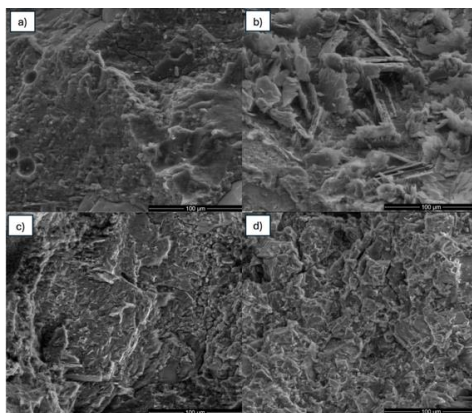


Fig. S3.7. Concrete specimens before and after freezing and thawing cycles; a) BS0 before testing; b) BS20 before testing; c) BS20 after 300 freezing and thawing cycles; d) BS30 after 300 freezing and thawing cycles

Images are presented at x1000 magnification. Images (a) and (b) are specimens before the freezing test: (a) is the control specimen BS0, and (b) is specimen BS20, which contained 20% glass processing waste. Images (c) and (d) are specimens after 300 freeze–thaw cycles: image (c) is specimen BS20 (20% glass processing waste), and (d) is specimen BS30 (30% glass processing waste). Before the freezing tests, the obtained images show intact surfaces with an undamaged surface structure; in photo (b), the portlandite plates and ettringite needle-shaped crystals are clearly visible.

During the alkali corrosion tests, the change in specimen length was measured after 5, 10, 15, and 20 weeks, with length change evaluated as a percentage. Test results are shown in Table S3.2. As the amount of glass processing waste increased from 0% to 30%, a decrease in length change was observed. The greater the proportion of glass processing waste in the specimens, the smaller the measured change.

Table S3.2. The results of the length change with different amounts of glass processing waste under the influence of alkalis

Specimen series \ Weeks	5	10	15	20
BS0	0.012 %	0.041 %	0.054 %	0.061 %
BS5	0.013 %	0.037 %	0.049 %	0.054 %
BS10	0.015 %	0.036 %	0.043 %	0.047 %
BS15	0.015 %	0.031 %	0.033 %	0.037 %
BS20	0.018 %	0.03 %	0.03 %	0.032 %
BS25	0.019 %	0.027 %	0.029 %	0.03 %
BS30	0.02 %	0.022 %	0.023 %	0.026 %

After the first measurements at 5 weeks, the smallest length change was recorded for the control specimen at 0.012%, and the largest change was in the specimen with the highest glass processing waste content (30%) at 0.02%. After 10 weeks, the specimen containing 30% glass waste showed a length change of 0.022%, while the control specimen showed 0.041%, indicating that mixtures with glass processing waste form less gel and fewer compounds under alkali attack, which suggests greater resistance to alkali exposure. After 15 weeks, the largest length change (0.054%) was observed for the control specimen, exceeding the 0.05% threshold. The specimen with the second largest change contained 5% glass processing waste (0.049%). The smallest length change (0.023%) was in the specimen with 30% waste. After 20 weeks, the largest length changes exceeding the 0.05% limit were measured in the control specimens and the specimens with 5% glass waste (0.061% and 0.054%, respectively). In all other specimens, the length change was smaller. As the proportion of glass processing waste in the mix increased, the length change decreased. The smallest shrinkage result was obtained for specimens with 30% glass processing waste, with a measured change of 0.026%. According to Lindgard et al. (2010), concrete with a length change not exceeding 0.05% can be considered resistant to alkali corrosion. Based on this criterion and the obtained results, it can be concluded that the greater the amount of glass processing waste used, the smaller the length change – supporting other researchers' findings that fine glass particles in concrete reduce the risk of alkali corrosion.

After calculating and summing the CO₂ emissions of materials per 1 m³ of concrete, the total emission values were determined. These values are presented in Figure S3.8. Compositions in which cement is replaced by glass processing waste show a more pronounced change in CO₂ emissions. The greater the proportion of cement replaced by glass processing waste, the lower the emissions per 1 m³. For example, comparing concrete with 20% cement replacement, CO₂ emissions are nearly 19% lower, and in the specimen with 30% glass processing waste, the CO₂ emissions decreased by 28%. Emissions drop significantly because the amount of the highest-CO₂-emitting material is reduced. The CO₂ emissions of waste-derived additives are often much lower than those of other constituent materials. This demonstrates that supplementary cementitious materials are very effective in reducing CO₂ emissions in concrete production.

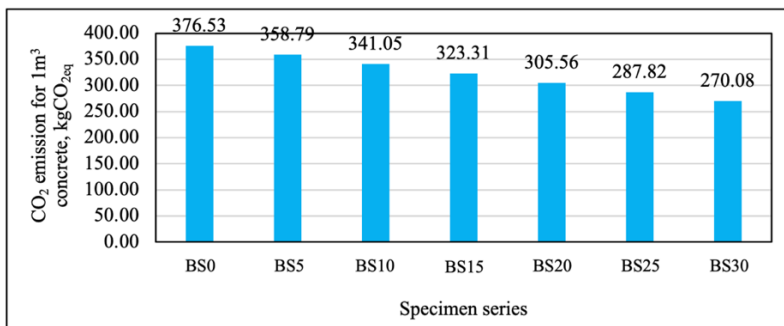


Fig. S3.8. Results of CO₂ emission with different amounts of glass processing waste per 1m³ of concrete

General conclusions

1. Glass processing waste is pozzolanically active (activity index reaching ~900), with an average particle size around 4 μm , which is approximately 3 times smaller than cement particles. These parameters allow glass processing waste to be used as a supplementary cementitious material. During drying, concrete sludge loses up to 70% of its mass; along with physically unbound water, the water bound within cement hydration products is also partially removed. Dried concrete sludge is not a pozzolanically active material and lacks binding properties; therefore, it cannot be used as a cement replacement.
2. Using higher amounts of wet sludge cement stone, the compressive strength increases by around 24% compared to control samples. This occurs due to the formation of a denser cement stone; its structure contains fewer unreacted cement minerals (C_2S and C_3S) and an increased amount of hydration products, indicating that wet concrete sludge activates cement hydration processes.
3. Increasing the cement replacement with glass processing waste up to 30% by mass impairs the rheological properties of the cement paste, causing the mixtures to thicken. Due to their fineness and high specific surface area, higher concentrations of glass particles hinder water access to cement particles, as water is retained on the surface of the glass. The incorporation of a functional crystallising additive not only improves the flowability of the paste but also reduces shrinkage in hardened concrete due to the formation of specific hydrates.
4. It was determined that using glass processing waste up to 20% by mass actively modifies the microstructure, which, due to high pozzolanic activity and the filler effect, increases the mechanical properties of the cement stone by up to 10%. This phenomenon supports the understanding of the research-based ratio between technological waste dispersity and clinker: exceeding the 20% threshold leads to an excess of dispersed particles in the system, which alters the rheology and promotes microporosity, thereby diminishing the benefits of the pozzolanic reaction. This identified regular limit is critical when designing low- CO_2 footprint concretes to maximise waste potential without negatively affecting matrix integrity.
5. Investigation into the durability of concrete with glass processing waste revealed:
 - In terms of freeze–thaw resistance, a critical cement replacement limit of 20% was identified, ensuring microstructure transformation: the pozzolanic activity of glass particles and the synergy of the crystallising additive form a closed-pore system (increasing their volume up to 55%), which compensates for ice expansion stresses and minimises internal damage. Beyond this limit, the lack of clinker results in insufficient surface layer mechanical resistance, leading to more intensive scaling.
 - Alkali–silica reaction (ASR) tests showed that as the glass waste content increases up to 30%, expansion decreases proportionally due to the accelerated binding of free alkalis and portlandite into stable C-S-H gels. The

stabilisation of mass changes after 10 weeks confirms the chemical resistance of the formed structure in aggressive environments. This provides a new understanding of using reactive waste not only as a filler but as an active component, ensuring durability.

6. It was proven that the complex integration of technological waste, glass processing waste and concrete sludge enables a 19% reduction in CO₂ emissions while maintaining concrete durability. This result justifies a new approach to sustainable concrete production: replacing clinker with up to 20% glass waste ensures a chemo-mechanical balance through the pozzolanic reaction, while using concrete sludge instead of sand, and part of the water acts as an inert micro-structural filler. The established 20% glass waste limit is the point beyond which clinker deficiency becomes the dominant factor, leading to the deterioration of physical and mechanical properties despite further reduction of the ecological footprint.

Recommendations

A sustainable concrete has been developed, incorporating glass processing waste as a partial cement replacement and concrete sludge as a partial fine aggregate replacement. This concrete is resistant to freeze–thaw cycles and alkali–silica reaction, ensuring long-term durability. The recommended composition for 1 m³ of sustainable concrete is as follows: cement – 320 kg, glass processing waste – 80 kg, sand (0/4) – 845.5 kg, dry concrete sludge – 44.5 kg, crushed dolomite (4/16) – 1040 kg, superplasticiser – 2.8 kg, air-entraining admixture – 0.4 kg, crystalline additive – 4 kg, wet concrete sludge – 16 kg, and water – 144 kg. This sustainable concrete is recommended for the production of frost-resistant and durable concrete structures.

Preparation of the sustainable concrete mix containing glass processing waste and concrete sludge:

1. First, concrete sludge, fine aggregate, and coarse aggregates must be batched into the concrete mixer and mixed for 15 seconds;
2. Cement and glass processing waste are then added simultaneously to the mixed aggregates and mixed for 15 seconds;
3. In the next step, water and chemical admixtures are added to the dry mix, with final mixing conducted for 60 seconds;
4. The resulting sustainable concrete mix is discharged into concrete truck mixers, transported, and placed using conventional methods;
5. The cast sustainable concrete is cured under ambient conditions for a period of 28 days.

Edvinas POCIUS

TECHNOLOGINĖMIS ATLIEKOMIS MODIFIKUOTO BETONO
ATSPARUMAS UŽŠALDYMO IR ATŠILDYMO CIKLAMS
BEI ŠARMINEI KOROZIJAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Medžagų inžinerija (T 008)

RESISTANCE OF TECHNOLOGICAL
WASTE-MODIFIED CONCRETE TO FREEZE–THAW CYCLES
AND ALKALINE CORROSION

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (T 008)

Lietuvių kalbos redaktorė Deimantė Grigaitė
Anglų kalbos redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2026 05 07. 11,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2026-022-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino UAB „Ciklonas“,
Žirmūnų g. 68, 09124 Vilnius