



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Betono su maltu stiklu ir ypač mažu portlandcemenčio kiekiu savybių tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Andrius Kaleininkas

Projekto autorius

Doc. Evaldas Šerelis

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Betono su maltu stiklu ir ypač mažu portlandcemenčio kiekiu savybių tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Andrius Kaleininkas

Projekto autorius

Doc. Evaldas Šerelis

Vadovas

Doc. Algirdas Augonis

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Andrius Kaleininkas

Betono su maltu stiklu ir ypač mažu portlandcemenčio kiekiu savybių tyrimai

Akademiniio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Andrius Kaleininkas

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
Magistro baigiamojo projekto užduotis**

Studijų programa:	
Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija	
Baigiamojo projekto tema (tematika, lietuvių k.):	
Betono su maltu stiklu ir ypač mažu portlandcemenčio kiekiu savybių tyrimai	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.:	
Nr. V25-09-35 (2025-12-01)	
(lietuvių k.):	
Betono su maltu stiklu ir ypač mažu portlandcemenčio kiekiu savybių tyrimai	
(anglų k.):	
Research on the Properties of Concrete with Glass Powder and an Ultra-Low Amount of Portland Cement	
Pradiniai duomenys darbui:	
Nėra.	
Kita papildoma su užduotimi susijusi informacija (pagal poreikį):	
Nėra.	
Atlikti:	Baigiamojo projekto dalys:
☒	Įvadas
☒	Literatūros apžvalga
☒	Metodologija
☒	Eksperimentiniai tyrimai
☐	Analitiniai tyrimai
☐	Skaitiniai tyrimai
☐	Ekonominė dalis
☒	Išvados
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo suderinimas su baigiamojo darbo vadovu:	
☐	Leidžiama
☒	Draudžiama
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo sąlygos (jei leidžiama), laikantis Universitete nustatytos GDI etiško naudojimo tvarkos:	
Konsultacijų laikas (su vadovu ir/ar konsultantu suderintas kas savaitinis konsultacijų laikas, kuris įvedamas į AIS, nurodant studento vidinį vidko kodą):	

Vadovas:	doc. Evaldas Šerelis
(indėlis 100 %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Konsultantas:	
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Socialinis partneris:	
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Andrius Kaleininkas
	<i>vardas, pavardė</i>
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Kaleininkas, Andrius. Betono su maltu stiklu ir ypač mažu portlandcemenčio kiekiu savybių tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Evaldas Šerelis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: maltas stiklas, gniuždomasis stipris, CO₂ emisijų mažinimas, cemento hidratacija, pucolaninė reakcija, betono šarminė korozija.

Kaunas, 2026. 58 p.

Santrauka

Magistrinio baigiamojo darbo tikslas – ištirti malto stiklo daromą įtaką betono mechaninėms, fizikinėms savybės ir atsparumui šalčio poveikiams, siekiant mažinti CO₂ emisijas.

Baigiamasis darbas sudarytas iš keturių dalių: literatūros analizės, tyrimuose naudotų medžiagų, eksperimentų metodų ir jų rezultatų. Literatūros analizės dalyje aprašomos stiklo ir portlandcemenčio cheminės sudėtys, malto stiklo savybės betono mišinio sudėtyse. Tirti cemento hidratacijos procesai, apžvelgiamos pucolaninės reakcijos galimybės naudojant aktyvius mineralinius priedus bei šarminės korozijos rizikos. Išanalizuoti atvejai, kaip galima suaktyvinti pucolanines reakcijas ir kaip suvaldyti ar išvengti šarminės korozijos. Taip pat apžvelgta malto stiklo įtaka betono užšalimo ir atšilimo ciklams bei betono su maltu stiklu praktinis panaudojimas. Tyrimuose naudotų medžiagų dalyje pristatomos tyrimuose naudotos medžiagos. Eksperimentų metodų dalyje aprašomi atlikti bandinių bandymo metodai. Eksperimentų rezultatų dalyje aprašytas konkretus malto stiklo gamybos procesas, nustatytas malto stiklo dalelių savitasis paviršius. Pusiau adiabatiniu kalorimetrijos metodu nustatytas cemento hidratacijos procesas naudojant maltą stiklą ir silicio mikrodulkes. Nustatytos naujų sudėčių fizikinės ir mechaninės savybės, tokios kaip betono mišinio pasklidimas, betono tankis, lenkimo ir gniuždymo stipriai, pateikti susitraukimo deformacijų rezultatai atliekant pagreitintos šarminės korozijos tyrimą bei nustatytas betono atsparumas šalčiui vienpusiu užšaldymo ir atšildymo tyrimu. Įvertintas naujų sudėčių aplinkos poveikis apskaičiuojant CO₂ emisijas ir jas palyginant su standartine betono sudėtimi.

Baigiamojo darbo apimtis – 16 lentelių, 56 paveikslai, 50 literatūros šaltinių.

Kaleininkas, Andrius. Research on the Properties of Concrete with Glass Powder and an Ultra-Low Amount of Portland Cement. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Evaldas Šerelis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: glass powder, compressive strength, reducing CO₂ emission, cement hydration, pozzolanic reaction, ASR reaction.

Kaunas, 2026. 58 p.

Summary

The aim of the master's thesis is to investigate the influence of ground glass on the mechanical and physical properties of concrete and its resistance to frost effects, with the aim of reducing CO₂ emissions.

The thesis consists of four parts: literature analysis, materials used in the research, experimental methods, and their results. The literature analysis part describes the chemical compositions of glass and Portland cement, as well as the properties of ground glass in concrete mixtures. The cement hydration processes are examined, and the possibilities of pozzolanic reactions using active mineral additives and the risks of alkali-silica reaction are reviewed. Cases of how to activate pozzolanic reactions and how to control or avoid alkali-silica reaction are analyzed. The influence of ground glass on the freeze-thaw cycles of concrete and the practical application of concrete containing ground glass are also reviewed. The part on materials used in the research presents the materials used in the experiments. The experimental methods section describes the methods applied for testing the specimens. The experimental results section describes the specific process of ground glass production and determines the specific surface area of ground glass particles. The cement hydration process using ground glass and silica fume was determined by the semi-adiabatic calorimetry method. The physical and mechanical properties of the new compositions, such as concrete mixture spread, density, flexural and compressive strength, are determined, and shrinkage deformation results are presented when performing an accelerated alkali-silica reaction test, as well as the resistance to salt-scaling of concrete is determined by the one-sided freezing and thawing method. The environmental impact of the new compositions was evaluated by calculating CO₂ emissions and comparing them with the standard concrete composition.

The master's final project consists of 16 tables, 56 figures and 50 references.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Paveikslų sąrašas	11
Santrumpų ir terminų sąrašas	13
Įvadas.....	14
1. Literatūros apžvalga	15
1.1. Stiklo ir portlandcemenčio cheminė sudėtis.....	16
1.2. Malto stiklo savybės betono mišinio sudėtyje.....	17
1.3. Cemento hidratacijos proceso analizė	17
1.4. Malto stiklo pucolaninės savybės	19
1.5. Aktyvių mineralinių priedų pucolaninių savybių palyginimas	22
1.6. Betono šarminė korozija.....	24
1.7. Malto stiklo įtaka betono užšalimo ir atšilimo ciklams.....	25
1.8. Malto stiklo panaudojimas ypač didelio stiprio betono (UHPC) sudėtyse.....	27
1.9. Betono su maltu stiklu praktinis panaudojimas.....	27
1.10. Atliktos literatūros analizės išvados	29
2. Tyrimams naudotos medžiagos	31
2.1. Portlandcementis	31
2.2. Maltas stiklas	32
2.3. Maltas kvarcinis smėlis	32
2.4. Kvarcinis smėlis	34
2.5. Silicio mikrodulkės.....	34
2.6. Superplastiklis D-190	35
3. Eksperimentinėje dalyje naudotų tyrimų metodai.....	36
3.1. Cemento hidratacijos tyrimas	36
3.2. Betono mišinio maišymas.....	36
3.3. Specifinio dalelių paviršiaus ploto nustatymo bandymas	37
3.4. Betono mišinio pasklidimo bandymas.....	37
3.5. Lenkiamojo stiprio nustatymo bandymas.....	37
3.6. Gniuždomojo stiprio nustatymo bandymas	38
3.7. Pagreitinios šarminės korozijos tyrimas	38
3.8. Susitraukimo deformacijų matavimas	38
3.9. Atsparumo šalčiui bandymas.....	38
4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai	39
4.1. Malto stiklo gamybos procesas	39
4.2. Savitojo paviršiaus tyrimo rezultatai	40
4.3. Pusiau adiabatiniu kalorimetrijos metodu nustatyti cemento hidratacijos rezultatai	40
4.4. Betono mišinio pasklidimo tyrimo rezultatai	42
4.5. Betono vidutinio tankio nustatymo rezultatai.....	43
4.6. Betono lenkiamojo stiprio tyrimų rezultatai.....	45
4.7. Betono gniuždomojo stiprio tyrimų rezultatai.....	47
4.8. Betono pagreitinios šarminės korozijos tyrimo rezultatai	49
4.9. Betono atsparumo šalčiui vienu metu užšaldymo ir atšildymo tyrimo rezultatai.....	50
4.10. Gaminant betoną išmetamo CO ₂ kiekio palyginamieji skaičiavimai	52

Išvados	54
Literatūros sąrašas	55
Priedai.....	59
1 priedas. DI naudojimo deklaracija.....	59
2 priedas. „ <i>Smart Build Environmental</i> “ konferencija.....	59

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Įvairių rūšių stiklo sudėtis [5].....	16
2 lentelė. Įvairių stiklo spalvų cheminė sudėtis [6].....	16
3 lentelė. Cheminė ir mineralinė portlandcemenčio CEM I 42,5 R sudėtis [7].....	17
4 lentelė. Portlandcemenčio CEM I 42,5 N cheminė sudėtis.....	31
5 lentelė. Portlandcemenčio CEM I 42,5 N eksploatacinės savybės	31
6 lentelė. Malto kvarcinio smėlio dalelių dydis, cheminė sudėtis ir fizikinės savybės [45]	33
7 lentelė. Kvarcinio smėlio dalelių dydis, cheminė sudėtis ir fizikinės savybės [45].....	34
8 lentelė. Silicio mikrodulkių cheminė sudėtis	35
9 lentelė. Tyrimuose naudoto superplastiklio fizikinės ir cheminės savybės	35
10 lentelė. Betono mišinio maišymo procesas	36
11 lentelė. Hidratacijos proceso tyrimo bandinių sudėtys ir žymėjimas.....	41
12 lentelė. Betono bandinių (mišinio) sudėtys.....	42
13 lentelė. Betono vidutiniai tankiai po 28 kietėjimo parų vandenyje.....	43
14 lentelė. Bandinių nutrupėjusių dalelių masės po 28 užšaldymo ir atšildymo ciklą	51
15 lentelė. Sudėtyse naudojamų medžiagų GWP reikšmės A1–A3 stadijai	52
16 lentelė. Betono sudėčių, visuotinio atšilimo potencialo A1–A3 stadijai, reikšmės.	53

Paveikslų sąrašas

1 pav. Stiklo atliekų Europos sąjungoje surinkimo grafinis žemėlapis [2].....	15
2 pav. Skirtingų rūšių stiklas: (a) natrio-kalkių stiklas; (b) „lead“ stiklas; (c) boro silikatinis stiklas; (d) aliuminio silikatinis stiklas [5].....	16
3 pav. Hidratacijos bandymo eksperimentinė įranga [10]	18
4 pav. Hidratacijos šilumos išsiskyrimo greitis [11].....	18
5 pav. Hidratacijos proceso pagreitinimo laikotarpis ir indukcinio laikotarpio pabaigos laikas [11].....	19
6 pav. SEM vaizduose matoma C-S-H kristalizacija ant malto stiklo dalelių paviršiaus po 2 h (kairėje) ir po 12 h (dešinėje) hidratacijos [7].....	19
7 pav. C-S-H gelio susidarymo pirminių ir antrinių hidratacijos reakcijų metu schema [5].	20
8 pav. Kairėje – kvarcinio smėlio grūdėliai, dešinėje – maltas stiklas [16].....	20
9 pav. Malto stiklo atliekos rentgeno struktūrinė analizė (XRD) [18].....	21
10 pav. Stiklo miltelių, portlandcemenčio ir silicio mikrodulkių dalelių dydžio pasiskirstymas (WG: stiklo atlieka (angl. <i>waste glass</i>) [18]	21
11 pav. Bandinių, kurių sudėtyje yra 20 % stiklo miltelių, atsparumo gniuždymui grafikas [18]. ..	22
12 pav. Medžiagų kalkių prisotinimo bandymo rezultatai [21].	23
13 pav. ASR-gelis cemente [9].	24
14 pav. Mikro nuotraukos mikro įtrūkimų analizė po 1000 užšalimo ir atšilimo ciklų [32].	25
15 pav. Betono su 22,5 % malto stiklo bandiniai po 100 užšalimo ir atšilimo ciklų (F100) [33]. ...	26
16 pav. Betono gniuždymo stiprio sumažėjimo procentas po 200 užšalimo ir atšilimo ciklų (F200) [34].	26
17 pav. Trijų ypač stipraus betono mišinio sudėčių tankio schema [38]	27
18 pav. Betono su malto stiklo ir ceolito bandinių spalvos palyginimas [39]	28
19 pav. Šaligatvio įrengimas naudojant G20 ir G40 betono mišinio sudėtis [42]	29
20 pav. Portlandcemenčio milteliai.....	31
22 pav. Maltas stiklas.....	32
21 pav. Malto stiklo gavybai paruošti Natrio-kalkių stiklo buteliai.....	32
23 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoto malto stiklo dalelių pasiskirstymas	32
24 pav. Malto kvarcinio smėlio dalelių dydžio pasiskirstymo kreivė [45]	33
25 pav. Maltas kvarcinis smėlis	33
26 pav. Kvarcinio smėlio dalelių dydžio pasiskirstymo kreivė [45].....	34
27 pav. Silicio mikrodulkės.....	35
28 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoto silicio mikrodulkių dalelių pasiskirstymas	35
29 pav. Pusiau adiabatinės kalorimetrijos tyrimo įranga ir duomenų registravimo sistema.....	36
30 pav. Betono mišinio maišytuvas „Automix“.....	37
31 pav. Betono atsparumo šalčiui tyrimo schema (sudaryta autoriaus).....	38
32 pav. Malto stiklo paruošimo procesas (sudaryta autoriaus).....	39
33 pav. Malto stiklo savitojo paviršiaus priklausomybė nuo malimo trukmės.....	40
34 pav. Malto stiklo dalelių dydžio matavimo procesas Bleino aparatu.....	40
35 pav. Portlandcemenčio su maltu stiklu paruošimas hidratacijos proceso tyrimui	41
36 pav. Malto stiklo įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui ($W/C = 0,30$)	41
37 pav. Silicio mikrodulkių įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui ($W/C = 0,55$).....	42
38 pav. Betono mišinio su maltu stiklu pasklidimo priklausomybės grafikas	43
39 pav. Betono mišinio pasklidimo bandymas (C435 matavimas).....	43
40 pav. Betono su maltu stiklu vidutinių tankių grafikas po 28 kietėjimo parų vandenyje.....	44

41 pav. Betono su maltu stiklu naudojant ultragarso dispergavimą vidutinių tankių grafikas po 28 kietėjimo parų vandenyje.....	44
42 pav. Betono su maltu stiklu lenkiamojo stiprio priklausomybės grafikas	45
43 pav. Betono su maltu stiklu taikant terminį kietinimą lenkiamojo stiprio priklausomybės grafikas	45
44 pav. C735 – C135 ir T-C735 – T-C135 bandinių palyginamasis lenkiamojo stiprio priklausomybės grafikas	46
45 pav. Betono su maltu stiklu naudojant ultragarso dispergavimą lenkiamojo stiprio priklausomybės grafikas	46
46 pav. Betono su maltu stiklu gniuždomojo stiprio priklausomybės grafikas	47
47 pav. Betono su maltu stiklu taikant terminį kietinimą gniuždomojo stiprio priklausomybės grafikas	47
48 pav. C735 – C135 ir T-C735 – T-C135 bandinių palyginamasis gniuždomojo stiprio priklausomybės grafikas	48
49 pav. Betono su maltu stiklu naudojant ultragarso dispergavimą gniuždomojo stiprio priklausomybės grafikas	49
50 pav. Bandinių susitraukimo deformacijų kreivės	49
51 pav. Betono su maltu stiklu gniuždomojo stiprio grafikas po pagreitinotos šarminės korozijos tyrimo	50
52 pav. Bandinių viršaus vaizdas po 28 užšaldymo ir atšildymo ciklų	51
53 pav. Bandinių apačios vaizdas po 28 užšaldymo ir atšildymo ciklų.....	51
54 pav. C135 bandinio po 28 užšaldymo ir atšildymo ciklų apatinės plokštumos vaizdas	51
55 pav. Betono su maltu stiklu masės nutrupėjimo kiekis po 28 užšalimo ir atšilimo ciklų	52
56 pav. C735 – C135 bandinių suminių GWP reikšmių grafikas	53

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

CO₂ – anglies dioksidas;

GP – maltas stiklas, (angl. *glass powder*).

Terminai:

Pucolanai – tai birios arba silpnai susicementavusios magminės ir nuosėdines uolienos, turinčios amorfinio silicio;

C-S-H junginys – kalcio silikato hidratas, (angl. *Calcium Silicate Hydrate*) – tai pagrindinis junginys, suteikiantis betonui stiprumą;

A1-A3 stadijų suminės GWP reikšmės – A1-A3 yra gyvavimo ciklas, aplinkos poveikis, kuris įvertina žaliavų tiekimo ir gamybos procesus. GWP – visuotinis atšilimo potencialas, (angl. *Global Warming Potential*).

Įvadas

Pasaulyje betono poreikis nenumaldomai auga. Norint užtikrinti tvarų betono panaudojimą reikia išspręsti daug problemų susijusių su betono stiprumu ir atsparumu aplinkos poveikiui. Mokslininkai vis bando atrasti alternatyvą tipiniam betonui pakeisti, kad galėtų sumažinti CO₂ emisijas nesuprastinant betono savybių. Vienas iš galimų sprendimo būdų – panaudoti aktyvius mineralinius priedus, tokius kaip malto stiklo atliekos. Ši medžiaga ne tik gali sumažinti CO₂ emisijas, bet ir pagerinti betono savybes.

Baigiamojo projekto esmė yra įvertinti stiklo atliekos antrinio panaudojimo galimybę, įvertinti daromą įtaką betono mechaninėms savybės ir atsparumui šalčio poveikiams. Taip pat atlikti palyginamąją analizę betono mišinio su naujai suprojektuotais mišiniais, kurių sudėtyje bus ypač sumažintas cemento kiekis, jį pakeitus malto stiklo atliekomis. Atlikus įvairius tyrimus ir eksperimentus, suprojektuoti optimaliausią betono mišinio sudėtį, stengiantis kuo daugiau sumažinti CO₂ emisijas, išlaikant nesuprastėjusias mechanines ir fizikines savybes.

Naujumas yra užtikrinamas betono mišinio sudėtyse ir malto stiklo paruošimo technologijoje.

Problematika – stiklo atliekos naudojimas siekiant sumažinti CO₂ emisijas ir jos suderinamumas nesumažinant gaminio mechaninių savybių bei atsparumo įvairiems išoriniams veiksniams. Naudojant malto stiklo atliekas, jos savyje gali turėti priemaišų, kurios gali pakenkti cemento hidratacijos procesams, dažnu atveju padidėja betono šarminės korozijos rizika. Taip pat, šios medžiagos kiekis nuolat didėja ir dėl nepakankamo perdirbimo ši atlieka kaupiasi sąvartynuose, o tai kelia tiek aplinkosauginių, tiek išteklių panaudojimo efektyvumo iššūkių.

Tikslas – ištirti malto stiklo įtaką betonui su ypač mažu portlandcemenčio kiekiu fizikinėms ir mechaninėms savybės bei atsparumui paviršiniam šaldymui ir atšildymui.

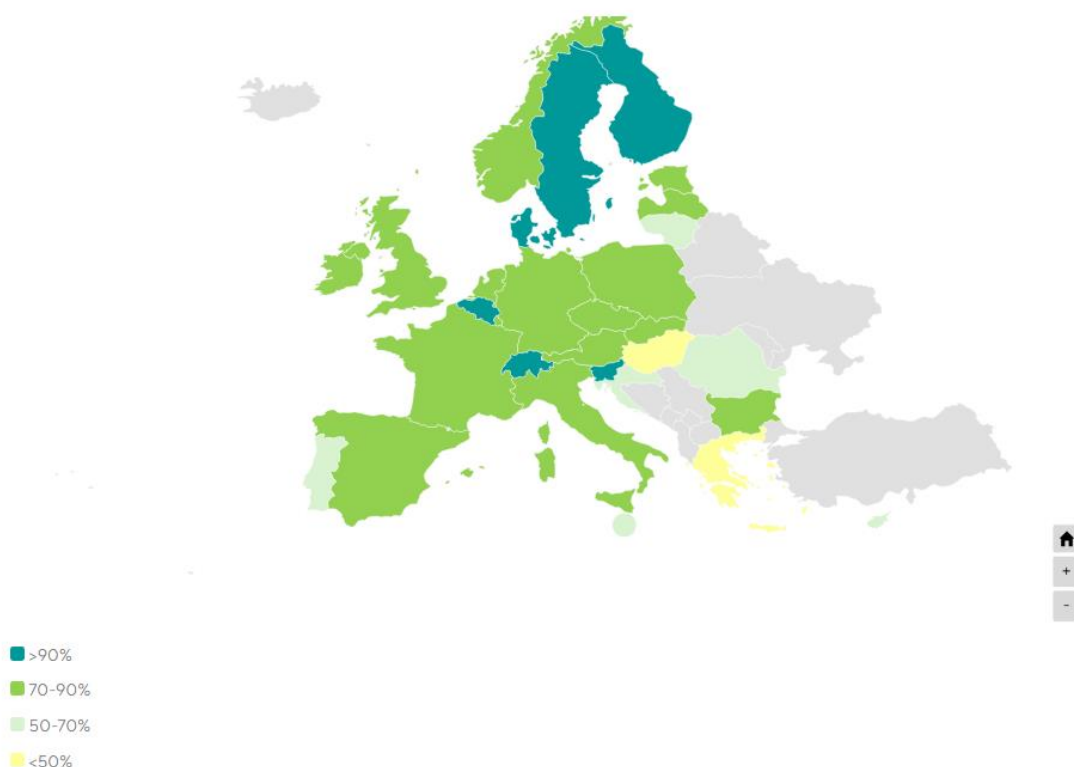
Baigiamojo projekto uždaviniai:

1. sukurti malto stiklo, išgauto iš komunalinių atliekų srauto, paruošimo technologiją;
2. ištirti malto stiklo įtaką portlandcemenčio hidratacijos procesui;
3. ištirti malto stiklo įtaką betonui mechaninėms ir fizikinėms savybėms, kai didelė dalis cemento pakeičiama maltu stiklu;
4. ištirti malto stiklo įtaką betonui atsparumui paviršiniam šaldymui ir atšildymui.

1. Literatūros apžvalga

Didėjant pasaulio gyventojų skaičiui, neišvengiamai auga ir įvairių išteklių poreikis. Ne išskirtinis atvejis yra ir betono poreikis. Remiantis Irmanto Barausko straipsniu [1] „cemento gamybos apimtis visame pasaulyje 2019 m. jau siekė apie 4,2 mlrd. tonų, kai 1995 m. – tik 1,39 mlrd. Tai rodo labai spartų ir globalų statybos pramonės augimą.“ [1]. Siekiant sumažinti cemento gamybos apimtis vis dažniau įvairūs tyrėjai ar mokslininkai stengiasi surasti betono mišinį, kuris darytų mažesnę poveikį aplinkai. Tai galima pasiekti naudojant mažesnę kiekį portlandcemenčio ir jo dalį pakeitus aktyviomis mineralinėmis medžiagomis.

Stiklas yra labai plačiai naudojama medžiaga, kurią sutinkame įvairiose srityse – nuo buities iki pramonės ir mokslo. Jis naudojamas langams, veidrodžiams, stiklo pakuotėms, išmaniųjų telefonų ekranams bei daugeliui kitų kasdieninių objektų. Stiklas dėl savo ilgaamžiškumo, skaidrumo ir cheminio atsparumo yra nepakeičiamas daugelyje gamybos procesų, tačiau nepaisant jo perdirbimo galimybių, stiklo atliekų tvarkymas išlieka svarbiu aplinkosauginiu iššūkiu. Remiantis 2022 m. statistikos duomenimis, Europos Sąjungoje vidutiniškai perdirbimui surenkama 80,2 % stiklo pakuočių atliekų, o Lietuvoje šis rodiklis siekia 67 %. Pagal atliktas apskaitas, reglamentuojama, kad 2022 m. Europos Sąjungoje stiklo atliekos susidarė apie 15,7 milijonų tonų, o Lietuvoje apie 78 110 tonų [2,3,4].



1 pav. Stiklo atliekų Europos sąjungoje surinkimo grafinis žemėlapis [2].

Stiklo atliekas galima technologiškai paruošti ir naudoti betono mišinio gamyboje, taip sumažinant stiklo atliekos kaupimąsi ir prisidėti prie anglies dioksido (CO_2) emisijų mažinimo. Maltas stiklas gali būti naudojamas kaip dalinis cemento pakaitalas, o tai ypač svarbu, nes cemento gamyba yra vienas didžiausių CO_2 šaltinių statybų sektoriuje.

1.1. Stiklo ir portlandcemenčio cheminė sudėtis

Norint panaudoti stiklo atliekas kaip žaliavą, reikia žinoti, kokių rūšių gali būti stiklas, kaip keičiasi stiklo cheminė sudėtis. Straipsnyje Sushant Poudel ir kt. [5] aprašyta įvairių stiklo rūšių cheminė sudėtis, kuri pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Įvairių rūšių stiklo sudėtis [5].

Stiklo tipas	SiO ₂ (%)	Na ₂ O + K ₂ O (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	B ₂ O ₃ (%)
„electric“ stiklas	52,0-56,0	0,0-2,0	16,0-25,0	12,0-16,0	-	-
Boro silikatinis stiklas	70,0-80,0	4,0-8,0	-	7,0	-	11,0-15,0
„lead“ stiklas	54,0-65,0	13,0-15,0	-	-	-	-
Natrio-kalkių stiklas	71,0-75,0	12,0-16,0	10,0-15,0	-	0,1-4,0	-
E-stiklas	59,9-61,3	0,7-0,81	21,4-21,9	12,5-12,6	2,7	-
Bario stiklas	36,0-35,0	7,0	2,0	2,0-4,0	9,0	10,0
Aliumo silikatinis stiklas	57,0-64,5	0,5-1	8,0-10,0	17,0-24,5	7,0-10,5	5,0



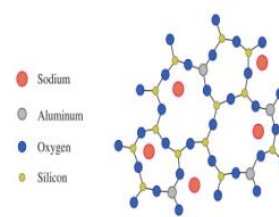
(a)



(b)



(c)



(d)

2 pav. Skirtingų rūšių stiklas: (a) natrio-kalkių stiklas; (b) „lead“ stiklas; (c) boro silikatinis stiklas; (d) aliuminio silikatinis stiklas [5].

Iš šių stiklo tipų labiausiai yra paplitęs natrio kalkių stiklas. Šis stiklas naudojamas languose, stiklainiuose ir buteliuose. Stiklas taip pat gali būti klasifikuojamas pagal jo spalvą. Stiklas gali būti skaidrus, gintaro spalvos, rudos, žalios arba baltos spalvos. Atlikta keletas tyrimų, kuriuose nagrinėtas stiklo spalvos poveikis cementui ir cementiniams mišiniams įvertinti. Šiuose tyrimuose minėta, kad stiklo spalva įprastai priklauso nuo stiklo cheminės sudėties. Tai reiškia, kad betono savybės gali skirtis priklausomai nuo naudojamo stiklo spalvos. Skaidraus stiklo, gintaro spalvos, rudos, žalios arba baltos spalvos cheminė sudėtis pateikta 2 lentelėje [5,6].

2 lentelė. Įvairių stiklo spalvų cheminė sudėtis [6].

Stiklo tipas	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)
Skaidrus stiklas	73,20-73,50	-	13,60-14,10	1,70-1,90	0,04-0,05	-	-
Gintaro spalvos stiklas	70,66	9,12	8,32	6,53	2,52	1,45	0,01
Rudas stiklas	72,10	-	-	1,74	0,31	-	0,01
Žalias stiklas	72,25	12,35	10,54	2,54	-	1,18	0,43-0,44
Baltas stiklas	69,82	8,76	8,42	1,02	0,55	3,43	-

3 lentelė. Cheminė ir mineralinė portlandcemenčio CEM I 42,5 R sudėtis [7].

Cheminė sudėtis (%)		Mineralinė sudėtis (%)	
SiO ₂	19,33	C3S	58,30
Al ₂ O ₃	5,15		
Fe ₂ O ₃	2,90	C2S	12,20
CaO	64,59		
MgO	1,25	C3A	8,75
SO ₃	3,23		
K ₂ O	0,47	C4AF	8,90
Na ₂ O	0,21		
Cl ⁻	0,05		

Portlandcemenčio ir stiklo atliekos cheminės sudėtys yra panašios, todėl dėl šių cheminių junginių panašumo gali būti tinkama formuoti betono mišinių sudėtis.

1.2. Malto stiklo savybės betono mišinio sudėtyje

Saber Ibrahim ir Amr Meawad [8] moksliniame straipsnyje paminėti malto stiklo rodikliai, į kuriuos būtina atsižvelgti naudojant butelius, kaip šios medžiagos žaliavą betono gamyboje. Naudojant iš komunalinių atliekų srauto išgautą stiklą kaip žaliavą, būtina įvertinti pakuočių sukibimą su butelių atliekomis, taip pat įvertinti malto stiklo dalelių dydį, pucolaninį aktyvumą ir šarminės korozijos reakciją (angl. *alkali silica reaction* – ASR).

Prieš malant butelius būtina užtikrinti, kad buteliai būtų švarūs – tyrimo rezultatai užtikrina, kad užtenka butelius plauti su karštu vandeniu, naudojant tinkamą emulsiklį, taip sumažinant medžiagos užteršimo riziką. Atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatyta, kad maltas stiklas pasižymi geru pucolaniniu reaktyvumu. Maltas stiklas dėl savo amorfinės struktūros gali efektyviai reaguoti su kalcio hidroksidu (Ca(OH)₂) ir prisidėti prie cemento rišimosi procesų. Tyrimo metu pastebėta, kad šarminės korozijos reakcija naudojant boro silikatinio stiklo žaliavą buvo intensyvesnė, nei naudojant natrio kalkių stiklo žaliavą. Straipsnyje taip pat akcentuojama šarminės korozijos reakcijos keliamą riziką, tačiau tyrimo metu nenustatytas optimalus dalelių dydis, kuris leistų kontroliuoti šarminės korozijos reakcijos intensyvumą taip, kad plėtimosi laipsnis neviršytų saugios ribos ir nepakenktų medžiagos mechaninėms savybėms. Ši reakcija įvyksta dėl cemento šarmų ir reaktyvaus silicio sąveikos cemento pastoje. Tokia reakcija gali sukelti kenksmingų išbrinkusių gelių susidarymą, dėl kurių atsiranda betone įtrūkimų [8].

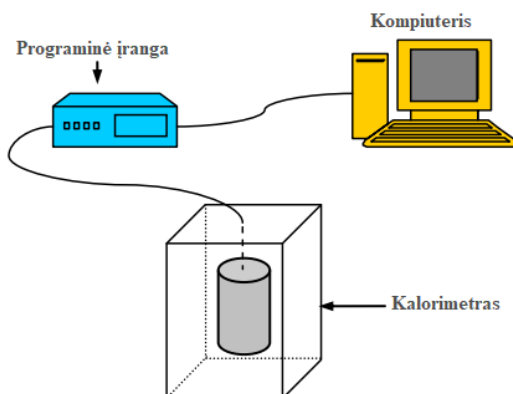
Remiantis Yulin Chen ir kt. [9] atliktu tyrimu, buvo nustatyta, kad naudojant stiklo miltelius, kurių dalelių dydis neviršija 75 μm, galima žymiai sumažinti šarminės korozijos riziką.

Šios stiklo savybės suteikia galimybę naudoti stiklo atliekas kaip dalinį cemento pakaitalą, tačiau norint išvengti šarminės korozijos rizikos, būtina kontroliuoti stiklo miltelių dalelių dydį ir cheminę sudėtį.

1.3. Cemento hidratacijos proceso analizė

Cemento hidratacija – tai procesas, kurio metu vyksta cheminė reakcija tarp cemento ir vandens. Cemento hidratacijos metu susidaro kietėjantys produktai, lemiantys betono stiprėjimą. Kai cementas

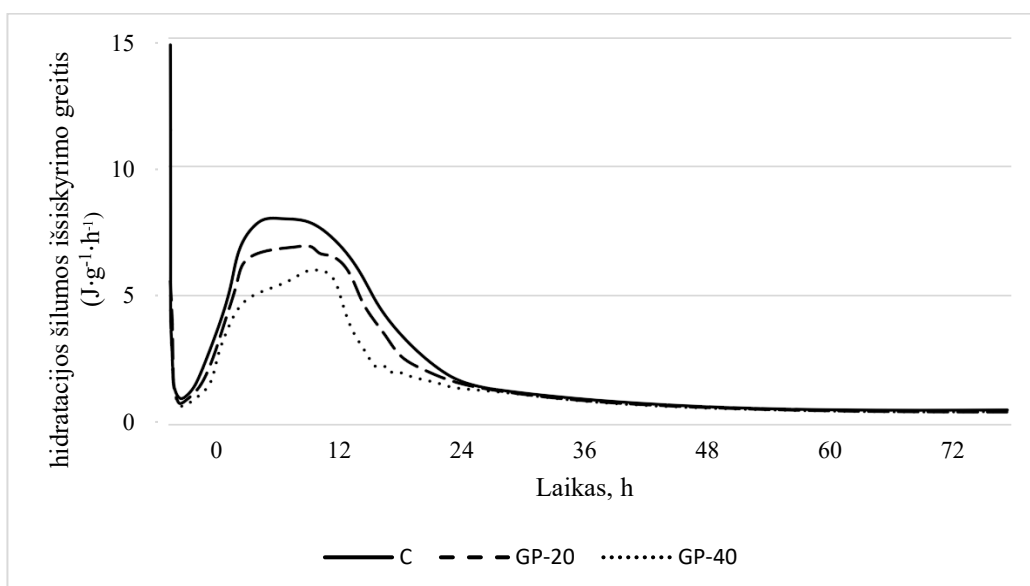
sumaišomas su vandeniu prasideda cheminė reakcija tarp cemento komponentų (ypač kalcio silikatų) ir susidaro nauji junginiai, tokie kaip kalcio silikato hidratatai (C-S-H) ir kalcio hidroksidas ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Šį procesą galima priskirti prie egzoterminių reakcijų, nes vykstant cheminiams virsmams šiluma išskiriama į aplinką. Cemento hidratacijos laikas ir išskiriamos šilumos kiekis gali būti įvairūs, nes jis priklauso nuo mišinio sudėties, dalelių smulkumo, vandens ir cemento santykio, aplinkos temperatūros ir priedų.



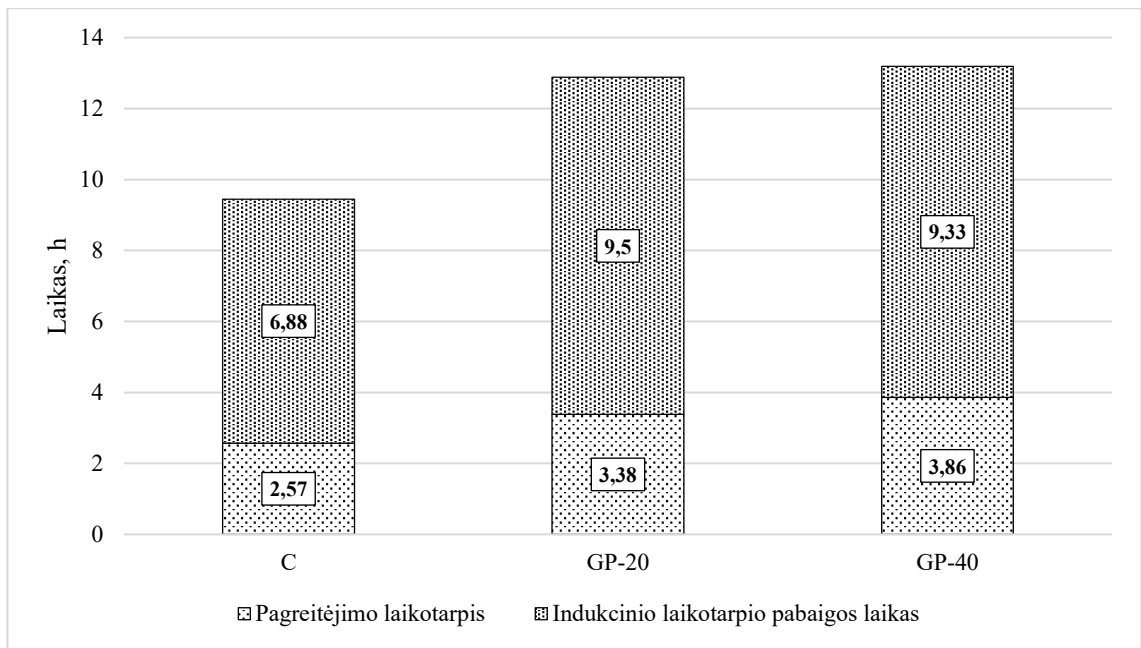
3 pav. Hidratacijos bandymo eksperimentinė įranga [10]

Xiaolin Chang ir kt. [11] bei Magdalena Dobiszewska ir kt. [7] pateiktose publikacijose išanalizuota stiklo miltelių daroma įtaka cementinių medžiagų hidratacijos kinetikai. Kalorimetriniais tyrimais nustatyta, kad hidratacijos šilumos išsiskyrimo greitis ir hidratacijos šilumos kiekis palaipsniui mažėja, o indukcijos ir pagreitėjimo periodai ilgėja didėjant malto stiklo kiekiui [11,7].

Izoterminiu kalorimetru nustatyta, kad tirtų bandinių hidratacijos procesai daugiau ar mažiau yra analogiški (žr. 4 pav.). 5 paveikslėlyje parodyta, kad C mėginio (gryno cemento) indukcijos periodas trunka 2,57 valandos, o GP-20 ir GP-40 atitinkamai apie 3,38 valandos ir 3,86 valandos [11]. Didėjant GP kiekiui, cemento klinkeris skiedžiamas, todėl padidėja santykinis vandens kiekis ir sumažėja santykinė Ca^{2+} koncentracija cementinėje sistemoje, todėl tai prailgina indukcijos periodo pabaigos laiką [11, 12].

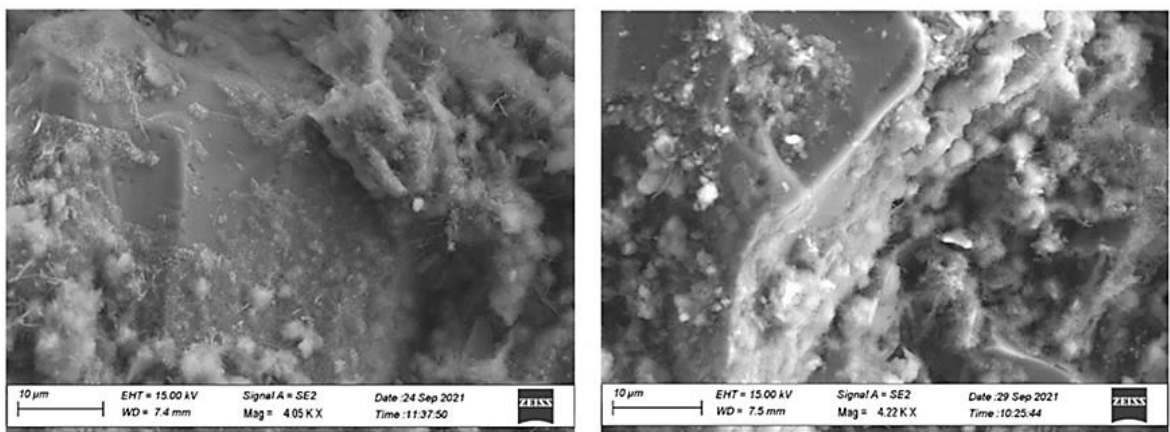


4 pav. Hidratacijos šilumos išsiskyrimo greitis [11]



5 pav. Hidratacijos proceso pagreitėjimo laikotarpis ir indukcinio laikotarpio pabaigos laikas [11]

Magdalena Dobiszewska ir kt. [7] malto stiklo daromą įtaką cemento hidratacijos procesams taip pat tyrė atlikdami cemento matricos mikrostruktūros analizę ankstyvuoju hidratacijos laikotarpiu. Pastebėta, kad C-S-H kristalizuojasi ant malto stiklo dalelių (žr. 6 pav.). Labai smulkios malto stiklo dalelės veikia kaip kristalizacijos centrai ir suteikia papildomą plotą, kuriame gali nusėsti C-S-H branduoliai. Taip pat nepastebėta padidėjusio vietinio poringumo ar susitraukimo įtrūkimų koncentracija.

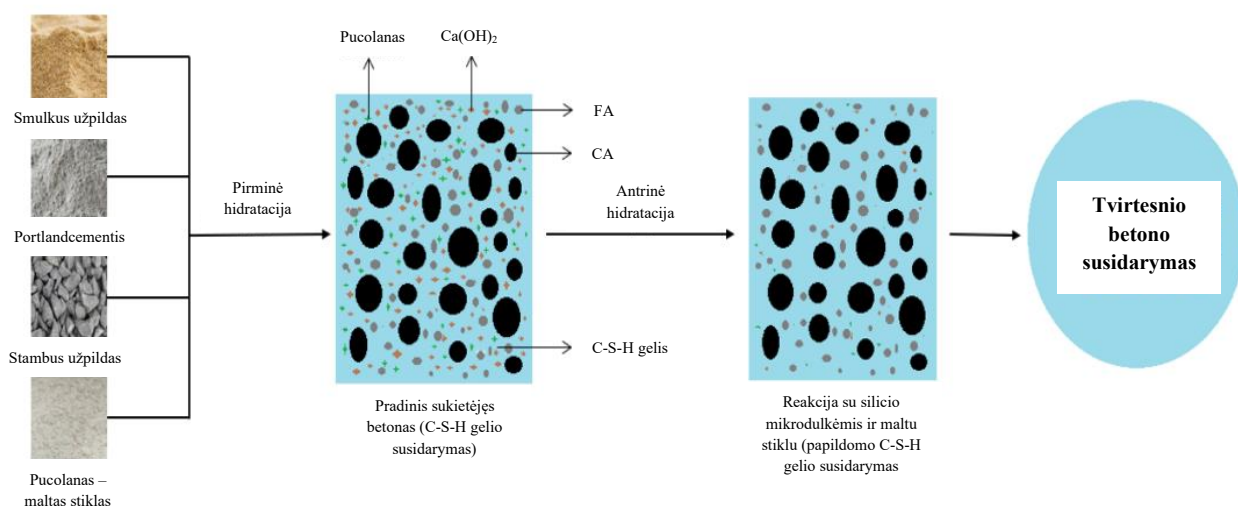


6 pav. SEM vaizduose matoma C-S-H kristalizacija ant malto stiklo dalelių paviršiaus po 2 h (kairėje) ir po 12 h (dešinėje) hidratacijos [7].

1.4. Malto stiklo pucolaninės savybės

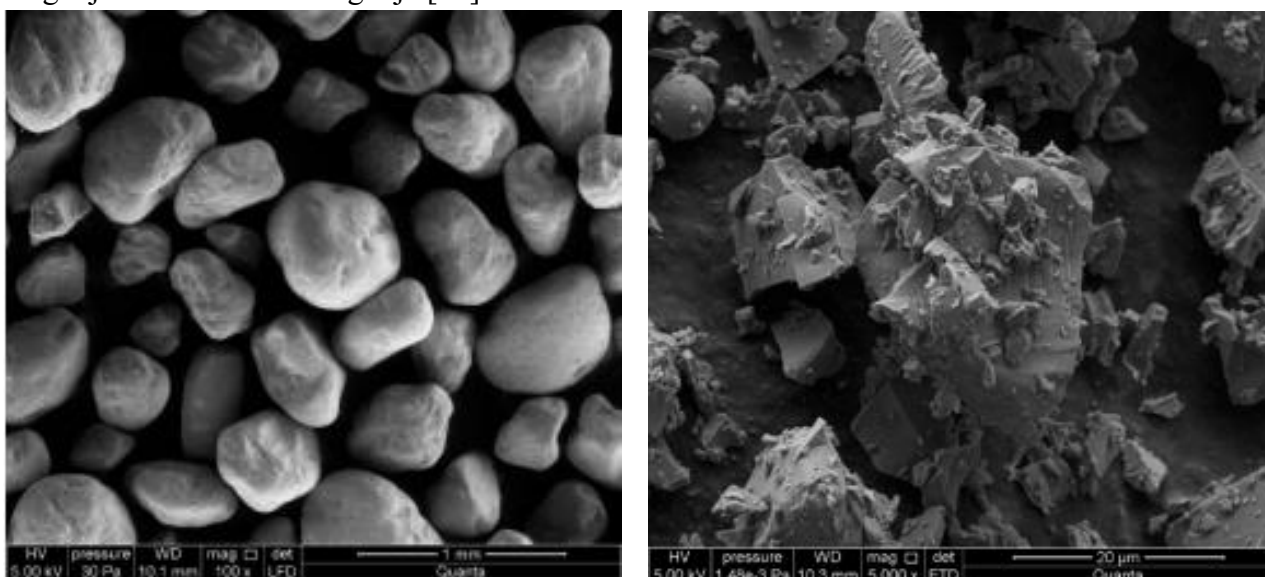
Pucolanai – tai birios arba silpnai susicementavusios magminės ir nuosėdines uolienos, turinčios amorfinio silicio. Drėgnoje aplinkoje jis gali jungtis su kalcio hidroksidu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ir formuoti kalcio hidrosilikatus (C-S-H). Stiklas yra amorfinė medžiaga, kurioje yra santykinai daug silicio ir kalcio. Kai stiklas smulkiai sumalamas, teoriškai jį galima laikyti mineraliniu užpildu. Malto stiklo atliekos pucolaninės reakcijos metu sąveikauja cemento hidratai, dar vadinami portlanditais, o susidarę kalcio silikato hidratai užpildo anksčiau susidariusias poras ir sutankina struktūrą, dėl to padidėja gniuždymo

stipris. Smulkiai sumaltoje stiklo atliekoje yra silicio dioksido (SiO_2), kuris gali reaguoti su hidratacijos metu susidariusiu kalcio hidroksidu (Ca(OH)_2) ir pucolaninės reakcijos metu padidinti kalcio silikato hidrato kiekį. [13, 14, 15].



7 pav. C-S-H gelio susidarymo pirminių ir antrinių hidratacijos reakcijų metu schema [5].

Pagrindinis skirtumas kodėl maltas stiklas gali veikti kaip pucolaninė medžiaga, o kvarcinis smėlis negali – jų molekulinis išsidėstymas ir dalelių dydis. Maltas stiklas dažniausiai sudarytas iš amorfinio silicio dioksido, o kvarcinis smėlis turi labai aiškią ir stabilią struktūrą, dėl šios priežasties drėgnoje šarminėje terpėje maltas stiklas gali reaguoti su kalcio hidroksidu, o kvarcinis smėlis labai lėtai reaguoja arba beveik nereaguoja [16].

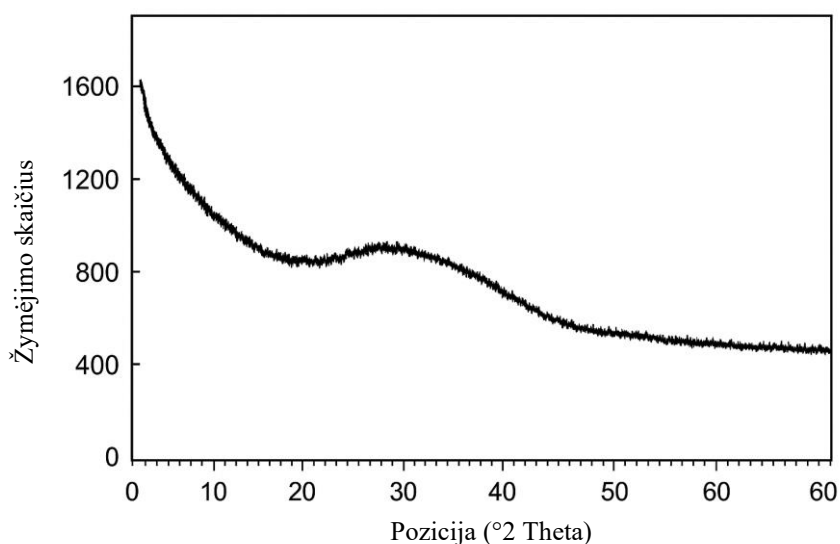


8 pav. Kairėje – kvarcinio smėlio grūdėliai, dešinėje – maltas stiklas [16]

Nagrinėtuose šaltiniuose teigiama, kad pucolaninės stiklo savybės pirmiausia pastebimos, kai dalelių dydis yra mažesnis nei $300\ \mu\text{m}$. Žemiau $100\ \mu\text{m}$ stiklas gali turėti pucolaninį reaktyvumą, kuris yra didesnis nei lakiųjų pelenų, kai cemento pakeitimo procentas yra mažas ir rezultatai matuojami po 90 dienų kietėjimo [17, 18, 19].

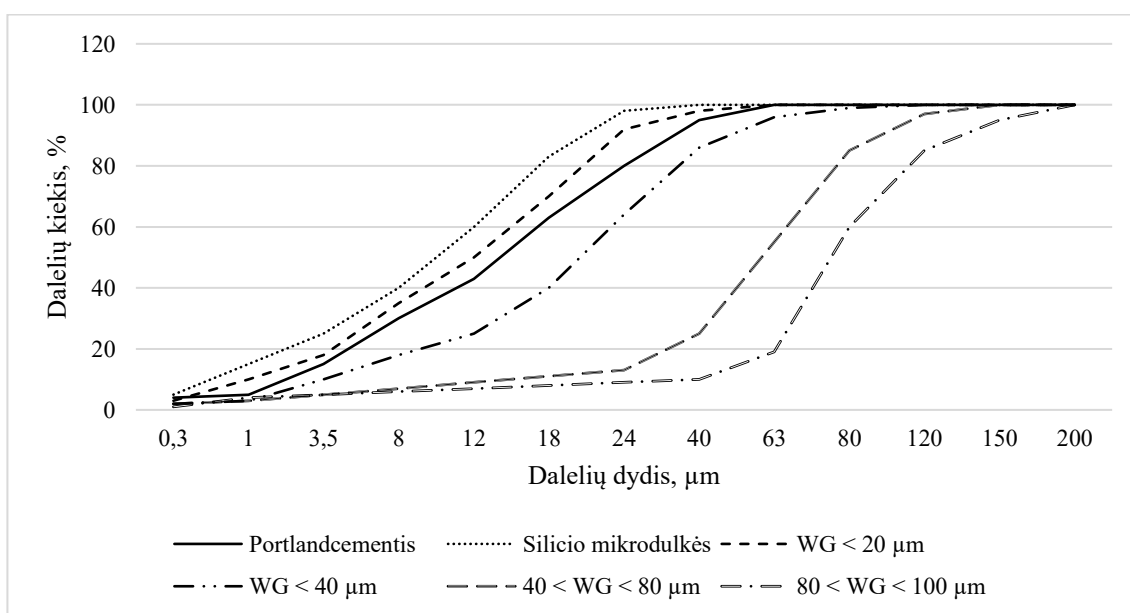
A. Khmiri ir kt. [18] pateiktoje publikacijoje buvo analizuojamas stiklo, kaip pucolaninės medžiagos, elgesys priklausomai nuo jo dalelių dydžio, kuomet jis buvo naudojamas kaip dalinis cemento pakaitalas. Siekiant paaiškinti maltos stiklo atliekos pucolaninį elgesį, kalcio hidroksido ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) mėginiai buvo sumaišyti su smulkiai susmulkintu stiklu ir pirmiausia išbandyti atlikus gniuždymo testą. Taip pat buvo analizuojami XRD ir SEM, siekiant nustatyti reakcijos produktus.

Cheminė sudėtis negali būti vertinama kaip vienintelis pucolaninio aktyvumo prognozės rodiklis – būtinas ir amorfinės fazės buvimo įvertinimas. Tai patvirtinta rentgeno struktūrinės analizės (XRD) rezultatais, kuriuose nefiksuota smailių, būdingų kristalinėms struktūroms (žr. 9 pav.) [18].



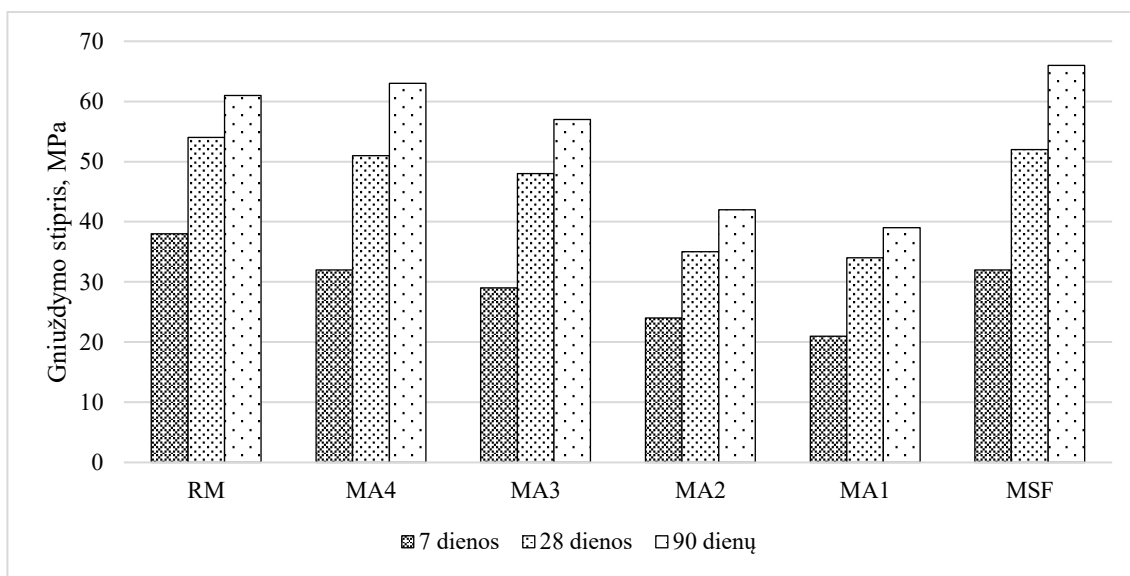
9 pav. Malto stiklo atliekos rentgeno struktūrinė analizė (XRD) [18].

Smulkumo įtakai pucolaniniam aktyvumui įvertinti buvo suformuotos keturios granulimetrinės frakcijos, kurių dalelių dydžiai atitinkamai siekė: <20; <40; 40-80; 80-100 μm . Stiklo miltelių, portlandcemenčio bei silicio mikrodulkių dalelių dydžio pasiskirstymas pateiktas 10 paveikslėlyje.



10 pav. Stiklo miltelių, portlandcemenčio ir silicio mikrodulkių dalelių dydžio pasiskirstymas (WG: stiklo atlieka (angl. waste glass)) [18]

Siekiant įvertinti malto stiklo įtaką bandinių stiprumo raidai ankstyvuoju ir vėlyvuoju kietėjimo laikotarpiu, buvo atlikti gniuždomojo stiprio bandymai. Cementas buvo pakeistas 20 % masės dalimi stiklo miltelių. Kiekvienos mišinio partijos bandiniai buvo tiriami po 7, 28 ir 90 parų, siekiant nustatyti atsparumą gniuždant. Tiek stiklo miltelių, tiek silicio mikrodulkių turinčių bandinių gniuždymo stipris 7 ir 28 parų amžiuje buvo mažesnis nei kontrolinio bandinio. Vis dėlto, po 90 parų kietėjimo bandinys, kuriame buvo 20 μm frakcijos stiklo miltelių, pasiekė 2 % didesnę stiprį nei kontrolinis bandinys, o bandinyje su 20 % silicio mikrodulkių – 6 % didesnę stiprį. Šie rezultatai leidžia teigti, kad 20 μm frakcijos stiklo milteliai gali būti naudojami kaip dalinis cemento pakaitalas bandinyje, neigiamai nepaveikiant jo mechaninių savybių [18].



11 pav. Bandinių, kurių sudėtyje yra 20 % stiklo miltelių, atsparumo gniuždymui grafikas [18].

Šis tyrimas patvirtina, kad atliekų stiklas, sumaltas iki mažesnio nei 20 μm dalelių dydžio, pasižymi pucolaniniu aktyvumu.

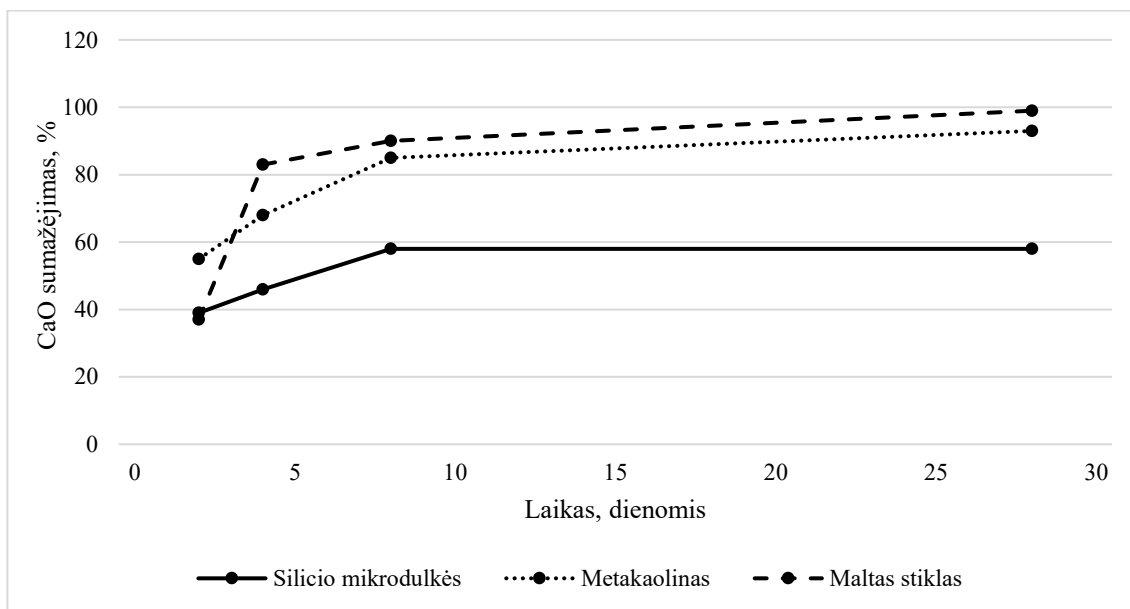
Remiantis Keren Zheng [20] atliktu tyrimu, stiklo miltelių pucolaninis aktyvumas priklauso nuo jų dalelių dydžio ir cheminės sudėties. Tyrimai parodė, kad smulkiai sumalti stiklo milteliai (<50 μm) pasižymi didesniu pucolaniniu aktyvumu, nes jų padidėjęs specifinis paviršiaus plotas skatina reakciją su kalcio hidroksidu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Pucolaninė reakcija ne tik formuoja kalcio silikato hidratus (C-S-H), bet ir mažina monosulfato kiekį, keisdama porų tirpalo sudėtį. Be to, ši reakcija ne tik sumažina šarminės korozijos reakcijos poveikį, bet ir padidina aliuminio koncentraciją porų tirpale, o tai slopina reaktyvaus silicio dioksido išsiskyrimą. Tai reiškia, kad maltas stiklas gali veikti kaip efektyvi pucolaninė medžiaga, jei jie yra pakankamai smulkūs ir turi tinkamą cheminę sudėtį, įskaitant pakankamą aliuminio kiekį [20].

1.5. Aktyvių mineralinių priedų pucolaninių savybių palyginimas

Nustatant malto stiklo pucolanines savybes mokslininkai taip pat jas palygina su kitų aktyvių mineralinių priedų pucolaninėmis savybėmis. Šių pucolaninių priedų kaip metakaolinas, stiklo milteliai ir silicio mikrodulkės buvo kelių mokslininkų tyrimų objektas [21, 22, 23].

Issiaka Sanou ir kt [21] atliko metakaolino, stiklo miltelių ir silicio mikrodulkių pucolaninio aktyvumo įvertinimą. Norint nustatyti šių medžiagų pucolaninį aktyvumą buvo atliktas kalkių prisotinimo bandymas. Šio bandymo metu gaminamas mišinys, kurio sudėtyje yra 1 g medžiagos ir

75 ml prisotinto kalkių tirpalo, kuris paruoštas ištirpinant 2 g hidratuotų kalkių 1 litre distiliuoto vandens. Hermetiškai uždarytame mišinyje laikomas bandymo laikotarpį – 1, 3, 7 ir 28 paras. Ca^{2+} jonų koncentracija skirtinguose mišiniuose nustatoma rentgeno fluorescencine spektroskopija (angl. *XRF*). Įvertinus pradiniam mišinyje esančių jonų kiekį ir medžiagoje užfiksuotą CaO kiekį galima nustatyti kaip bandymo laikotarpio funkciją [21].



12 pav. Medžiagų kalkių prisotinimo bandymo rezultatai [21].

Metakaolinas – tai medžiaga, kuri išgaunama iš kaolinitinių molių, kurie yra plačiai paplitę žemės plutoje, termiškai apdorojant prie 600 – 800 °C temperatūroje. Šio proceso metu pašalinama kristalinė struktūra ir sukuriamą amorfinė forma. Metakaolinas kaip pucolaninė medžiaga yra gausus aliuminio oksido ir geležies oksido dėl savo molingos žaliavos mineraloginės sudėties. Jį naudojant kaip cemento priedą, galima pagerinti kompozitų savybes, tokias kaip ilgaamžiškumas, mechaninis stiprumas ir atsparumas cheminiam poveikiui [21, 24].

Silicio mikrodulkės – tai metalinio silicio arba ferosilicio gamybos šalutinis produktas susidarantis aukštatemperatūroje krosnyse. Naudojant mineralinius priedus, tokius kaip silicio dioksido milteliai, dėl jų smulkių dalelių, didelio paviršiaus ploto ir didelio SiO_2 kiekio, betono stiprumas ir ilgaamžiškumas gali padidėti. Silicio mikrodulkių dalelės yra mažesnės nei cemento, todėl jos gali užpildyti cemento teslos poras ir dėl to tekstūra tampa tankesnė ir nepralaidesnė [25].

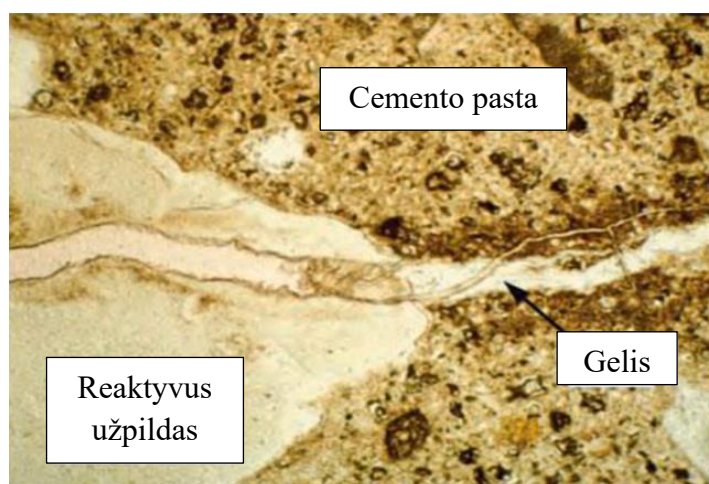
12 paveikslėlyje pateikta grafinė analizė rodo, kad medžiagų kalkių fiksacijos greitis priklauso nuo apdorojimo trukmės. Per pirmąsias 24 valandas metakaolinas pasižymėjo itin intensyvia kalkių sunaudojimo kinetika – jo fiksacijos greitis viršijo 50 %. Tuo tarpu stiklo miltelių ir silicio dioksido miltelių fiksacijos greičiai siekė atitinkamai 35,26 % ir 36,92 %. Nuo trečios dienos stiklo miltelių pucolaninis reaktyvumas žymiai išauga, o per 28 dienas jų kalkių fiksacijos greitis viršija 99 %. Toks aukštas stiklo miltelių reaktyvumas tikėtina susijęs su jų amorfine struktūra. Priešingai, silicio dioksido miltelių kalkių fiksacijos greitis nuo trečios dienos išlieka žemas ir tarp 7 bei 28 dienų beveik nebekinta, o šį mažą reaktyvumą lemia didelis kvarco kiekis jų sudėtyje. [21].

1.6. Betono šarminė korozija

Stiklo atlieka yra lengvai perdirbama medžiaga, tačiau daugumoje atvejų stiklo atliekos surenkama per daug, kad būtų galima jas visas perdirbti, todėl ieškomi alternatyvūs stiklo atliekos mažinimo sprendimai. Vienas iš galimų sprendimų – stiklo atliekos naudojimas kaip dalinis cemento pakaitalas, siekiant sumažinti cemento suvartojimą. Tačiau, pagal atliktus tyrimus, nustatyta, kad dėl naudojamo stiklo atliekos kaip smulkaus užpildo atsiranda rizika šarminės korozijos reakcijai.

Šarminių užpildų reakcija (AAR) reiškia cheminę reakciją tarp betono šarmų ir su šarmais reaguojančių užpildų, dėl kurių betonas plečiasi ir įtrūksta. AAR yra sunku sustabdyti, o tai sukelia negrįžtamą žalą betono ilgaamžiškumui, kuris yra žinomas kaip „betono vėžys“ (angl. „concrete cancer“) [9].

Tarp AAR tipų šarminio silicio dioksido reakcija (ASR) yra labiausiai atpažįstama ir paplitusi. ASR charakteristika yra netvarkingi tinkliniai įtrūkimai betono paviršiuje ir ASR gelis porose, kaip parodyta 13 pav. [9]. ASR gelis sugeria vandenį, sukeldamas plėtimąsi ir generuodamas vidinį slėgį reaktyviosiose užpildo dalelėse ir cemento pastoje, dėl ko galiausia medžiaga išsiplečia ir sutrūkinėja [24]. Taip pat dėl savo klampumo ir kietumo ASR-gelis neteka betono porose ir lengvai sugeria vandenį, kad išsipūstų [9].



13 pav. ASR-gelis cemente [9].

Šarminės korozijos reakcijai vykti reikalingas didelis šarmingumas, drėgmė, aukšta temperatūra ir didelis CaO kiekis. Didelį šarmingumą sukelia NaOH cementiniame skiedinyje. Šiai reakcijai vykti būtina didesnė nei 80-85 % santykinė drėgmė betone, o aukštesnė temperatūra spartina progresą. Taip pat didelis CaO kiekis - ypač portlancemente, skatina šarmų kaupimąsi [27, 28].

Abdullah Almakrab ir kt. [27] straipsnyje išsamiai analizuojama šarminės korozijos reakcijos problema betone bei įvairūs jos mažinimo būdai. Vienas iš teorinių būdų – sumažinti portlandcemenčio kiekį, jį pakeitus medžiagomis, kuriose yra mažesnis CaO kiekis. Tokiu būdu sumažinama šarminės korozijos reakcijos pradžios tikimybė.

Dažniausiai moksliniuose straipsniuose pasitaikantis bandymas siekiant įvertinti šarminės korozijos daromą įtaką buvo ASTM C1260-7, geriau žinomas kaip pagreitinto skiedinio strypo bandymas (AMBT). Šis bandymas matuoja betono plėtimąsi dėl ASR pagreitinomomis aplinkos sąlygomis. Pirmiausia po formavimo bandiniai turi būti kietinami kambario temperatūroje esant 95-100%

santykinei drėgmei 24 valandas, sekančiais 24 valandas kietinami 80 °C temperatūroje vandenyje. Tuomet mėginiai 14 dienų turi būti laikomi visiškai panardinti į natrio hidroksido tirpalą, kurio 80 °C temperatūra palaikoma pastovi. Bandinių plėtimasis per šį laikotarpį turi būti stebimas ir vertinamas vadovaujantis standartais. Remiantis bandymo kriterijais, pucolantai yra laikomi veiksmingais mažinant ASR, jeigu skiedinio mėginių išsiplėtimas neviršija 0,10 % po 14 parų [26, 27, 28, 29, 30, 31].

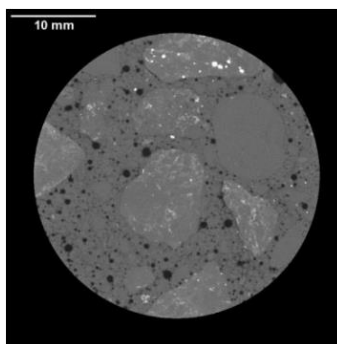
Atliktuose panašiuose moksliniuose tyrimuose, daromos išvados, kad naudojant stiklo miltelius kaip cemento ar smulkaus užpildo dalinį pakaitalą, galima sumažinti šarminės korozijos riziką. Atliktų tyrimų metu dažniausiai pakeistas stiklo miltelių kiekis, kurių dydis neviršija 200 µm, iki 30% slopino šarminės korozijos reakcijos atvejus [27, 28, 30].

1.7. Malto stiklo įtaka betono užšalimo ir atšilimo ciklams

Projektuojant betonines konstrukcijas, kurios veikiamos užšalimo ir atšilimo ciklų, itin svarbu įvertinti betono struktūrinius ypatumus bei atsparumą drėgmei ir šalčiui. Šalčio poveikis gali sukelti didelį betono pažeidžiamumą, ypač jei jo struktūra nėra pakankamai tanki ar atspari vandens įsiskverbimui. Užšalus betonui, prisotintam vandens, šis išsiplečia, o susidariusios vidaus jėgos gali sukelti mikrotrūkius. Kiekvienas užšalimo ir atšilimo ciklas dar labiau gilina šiuos pažeidimus, todėl ilgainiui tai smarkiai sumažina konstrukcijos ilgaamžiškumą ir patikimumą.

Atliekant laboratorinius užšalimo ir atšilimo ciklus galimi du tyrimo būdai: tūrinis arba paviršinis šaldymas. Tūrinio šaldymo metu vertinamas bendras (tūrinis) bandinio atsparumas šalčiui. Bandymas atliekamas bandinius visiškai panardinus į vandenį ir leidžiant pilnai sugerti vandenį, tada jis užšaldomas iki maždaug -20 °C, o vėliau atšildomas iki +20 °C. Vienu ciklu laikomas vienas užšaldymas ir vienas atšildymas. Po šių ciklų matuojamas masės praradimas – netekto svorio procentas ir tikrinamas atsparumo sumažėjimas gniuždymo bandymu. Paviršinio šaldymo tyrime vertinamas tik paviršinis atsparumas šalčiui ir skaičiuojamas masės praradimas nuo paviršiaus, kuris skaičiuojamas kg/m².

Marija Krstic ir kt. [32] tyrė malto stiklo įtaką betono struktūrai ir atsparumui užšalimo ir atšilimo ciklams. Šiame tyrime buvo vertinamas betonas, kurio cemento dalis pakeista 20, 30 ir 40 % maltu stiklu. Eksperimentiniai tyrimų rezultatai parodė, kad bandiniai po 1000 ciklų (F1000) išlaikė daugiau nei 90 % pradinio savo dinaminio elastingumo modulio, o masės nuostoliai buvo mažesni nei 1 %. Taip pat atlikus rentgeno mikrokompjuterinę tomografiją (angl. *X-ray micro-tomography*), nustatyta, kad didesnis malto stiklo kiekis pagerina porų struktūrą taip mažindamas mikrotrūkių susidarymo tikimybę. [32].



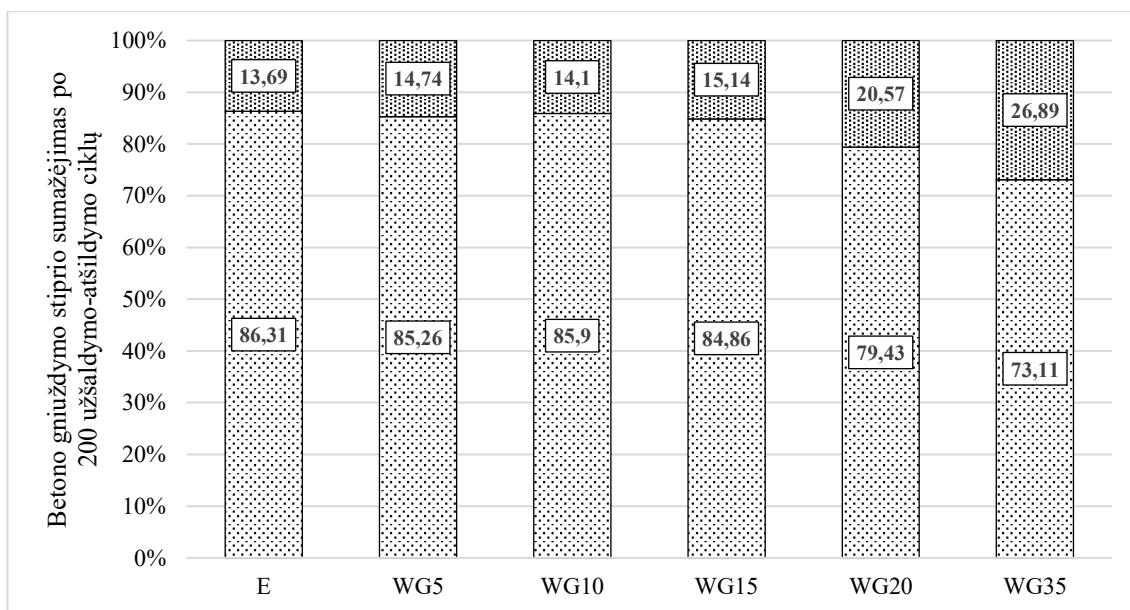
14 pav. Mikro nuotraukos mikro įtrūkimų analizė po 1000 užšalimo ir atšilimo ciklų [32].

Panašų tyrimą, siekdamas įvertinti užšalimo ir atšilimo ciklų poveikį betonui kuriame naudojamas maltas stiklas atliko ir Robert Jurczak ir kt [33]. Šio tyrimo metu bandiniai gaminami mažos betono klasės – C12/15, kuri gali būti naudojama kaip betono pagrindo medžiaga, kelio drenažo latakams ar kelkraščiams paremti. Mišinyje kaip užpildas buvo naudojamas maltas stiklas nesumažinant cemento kiekio. Eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė teigiamą poveikį atsparumo užšalimo ir atšilimo ciklams, jeigu malto stiklo kiekis neviršija 40 % (skaičiuojant nuo cemento masės). Mišinyje, kuriame buvo naudojama 45 % malto stiklo pastebėtas padidėjęs porų susidarymas [33].



15 pav. Betono su 22,5 % malto stiklo bandiniai po 100 užšalimo ir atšilimo ciklų (F100) [33].

Dar vieną tyrimą atliko Dusan Zoran Grdic ir kt. [34] kuriame nagrinėjama betono, kurio dalis cemento buvo pakeista malto kineskopo plokštelinio stiklo milteliais, kurių dalelės buvo smulkesnės nei 63 μm , ilgaamžiškumo bandymai. Eksperimentiniame tyrime cemento, pakeisto stiklu, procentinė masės dalis sudarė 5, 10, 15, 20 ir 35 %. Norint nustatyti betono ilgaamžiškumą buvo atliekamas atsparumas užšalimo ir atšilimo ciklams. Betono ilgaamžiškumas įvertintas po 200 ciklų atliekant gniuždomojo stiprio bandymus. Diagramoje (žr. 16 pav.) matyti betono gniuždomojo stiprio sumažėjimas po 200 užšalimo ir atšilimo ciklų [34].



16 pav. Betono gniuždomojo stiprio sumažėjimo procentas po 200 užšalimo ir atšilimo ciklų (F200) [34].

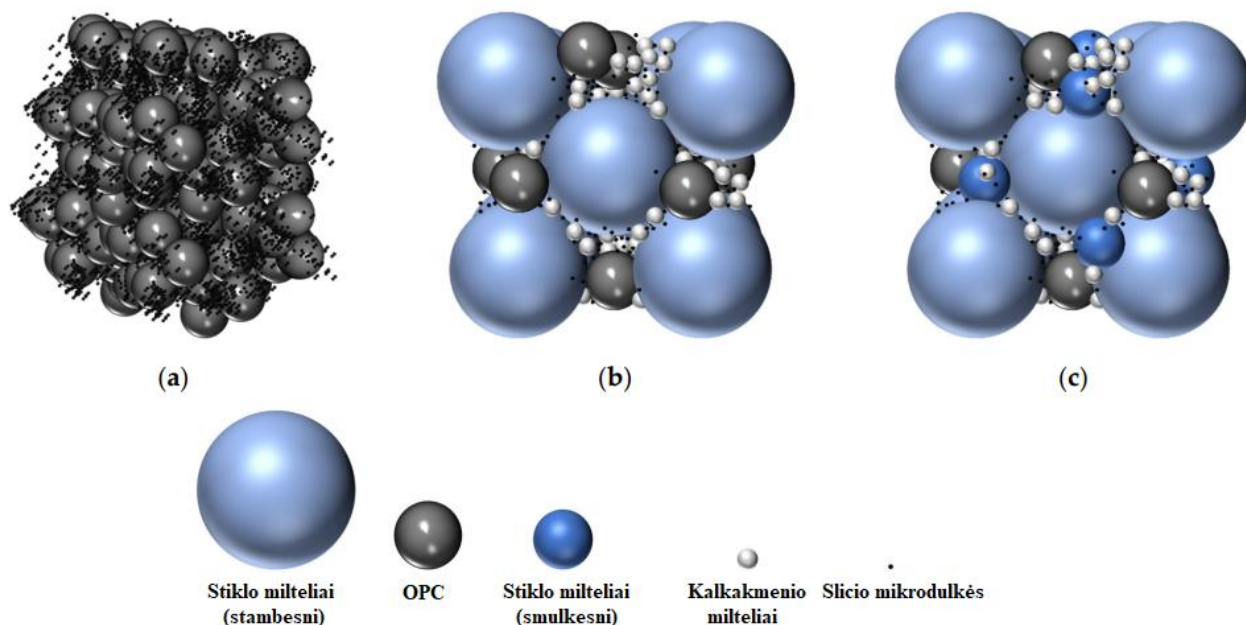
Diagramoje 100 % reprezentuoja kiekvieno eksperimentinio betono mišinio atitinkamą etaloninio mėginio, sukietėjusių vandenyje iki ekvivalentiško amžiaus, stiprumo vertę procentais. Raudoname lauke esanti procentinė dalis reprezentuoja procentinę kiekvienos serijos stiprumo sumažėjimą. Serijose, kuriose iki 15 % pakeista stiklu, po 200 ciklų gniuždomasis stipris sumažėjo 14-15 %, sekančiai pakeistoje serijoje 20 % stiklu - sumažėjo 20,57 %, o pakeitus 35 % stiklu - sumažėjo 26,89 %. [34].

Panašius rezultatus pateikė ir Roz-Ud-Din Nassar ir kt. [35], tirdami betono mišinius, kuriuose dalis cemento (iki 20 % pagal masę) buvo pakeista maltu buitiniu stiklu, o kaip užpildas naudotas perdirbtas betonas. Po užšalimo ir atšilimo ciklų buvo atlikti gniuždomojo stiprio bandymai, kurie parodė, kad toks pakeitimas nepablogina betono atsparumo šalčiui [35].

1.8. Malto stiklo panaudojimas ypač didelio stiprio betono (UHPC) sudėtyse

Taip pat buvo atlikti įvairūs tyrimai ir su ypač stipraus betono sudėtimis, siekiant nustatyti, kaip maltas stiklas gali pakeisti įprastas miltelines medžiagas ypač stipraus betono gamyboje, tokias kaip kvarcinis smėlis, portlandcementis, silicio mikrodulkės [36, 37].

Straipsniuose teigiama, kad nors ir sumažėjus portlandcemenčio kiekiui mišinyje, naudojant maltą stiklą galima išlaikyti ar net padidinti gniuždomąjį stiprį. Taip yra dėl to, nes maltas stiklas veikia kaip pucolaninė medžiaga, kartu pagerindama bandinių porėtumą ir reologines savybes. 17 paveikslėlyje a) pavaizduota kontrolinė ypač stipraus betono sudėtis be alternatyvių priedų, o b) ir c) pavaizduota su skirtingo dydžio stiklo milteliais [38].



17 pav. Trijų ypač stipraus betono mišinio sudėčių tankio schema [38]

1.9. Betono su maltu stiklu praktinis panaudojimas

Daugelis mokslininkų vis bando sukurti betoną, kuris būtų draugiškas aplinkai panaudojant atliekas. Keletas mokslininkų atliko tyrimus bandydami pakeisti dalį cemento maltu stiklu, stiklo grūdeliais ir panašiomis jo formomis ir bandymus atlikti ne tik laboratorijoje, bet ir realizuoti tai konstrukcijose [39, 40, 41, 42, 43, 44].

Apie betono, kurio smulkusis užpildas dalinai pakeistas maltu stiklu, savybes ir praktinį panaudojimą rašė L. Anjali Balan ir kt. [39]. Straipsnyje teigiama, kad malto stiklo teigiamas poveikis atveria galimybes tokį gaminį panaudoti miesto dangoms, tokioms kaip šaligatviai, gatvių ar aikščių dangoms bei parkavimo aikštelėms. Betonas su nedidele dalimi malto stiklo pakeičia savo standartinę spalvą – pašviesėja. Todėl mokslininkai atliko tyrimą ir paaiškėjo, kad paviršiaus temperatūrą galima sumažinti net keliais laipsniai, todėl tokia danga gali padėti kovoti su miesto karščio problemomis. Taip pat tyrime nustatyta, kad tinkamai parinkus stiklo dalelių dydį galima išlaikyti reikiamas mechanines savybes kartu sumažinant ir deformacijas dėl temperatūrinių pokyčių. Toks betonas gali būti naudojamas ne tik kaip konstrukcinė danga, bet ir kaip tvari ir energetiškai efektyvesnė priemonė viešosiose erdvėse, kur svarbiausia yra išlaikyti komfortą, ilgaamžiškumą ir karščio rizikos mažinimą [39].



18 pav. Betono su malto stiklo ir ceolito bandinių spalvos palyginimas [39]

Atlikti Lukasz Golek [40] tyrimai parodė, kad maltų stiklo drožlių naudojimas yra tinkamas pramoninei surenkamųjų betoninių elementų gamybai. Tyrimuose malto stiklo drožlės buvo lyginamos su lakiųjų pelenų daroma įtaka. Nustatyta, kad pakeitus 25 % cemento malto stiklo drožlėmis gniuždomasis stipris padidėjo apie 20 % lyginant su analogiškai pakeista dalimi lakiųjų pelenų. Per 56 dienas tyrime neužfiksuota jokių stiprumo sumažėjimų, kurie galėtų būti susiję su žalingais šarmais. Tyrimo rezultatas – malto stiklo drožlės gali būti sėkmingai naudojamos kaip lakiųjų pelenų pakaitalas gaminant surenkamuosius betoninius elementus [40].

Straipsnyje apie naują architektūrinį betoną su perdirbtu stiklu B. Tamayo-Garcia ir kt. [41] pateikia betono mišinio sudėtis naudojant susmulkintą stiklą iki labai mažų grūdėlio dydžio. Ne visada betonas yra naudojamas kaip konstrukcinis elementas, dažnai dėl savo eksploatacinių savybių, betonas yra naudojamas kaip dekoratyvinis elementas, pavyzdžiui – fasadinės plokštės. Šiame straipsnyje atlikti mechaniniai fasadinių plokščių tyrimai parodė, kad panaudojus smulkius stiklo grūdėlius vietoj stambaus užpildo yra įmanomas. Straipsnyje paminėta, kad naudojant didelį kiekį stiklo grūdėlių jie

skirtingai daro įtaką gniuždymo ir lenkimo rezultatams, todėl naudojant kaip fasadines plokštes, būtina užtikrinti tolygias apkrovas naudojant armatūrinius pluoštus [41].

Remiantis atliktų tyrimų laboratorijoje ir lauko bandymų rezultatais M. Krstic ir Julio F. Davalos [42] pateikė išvadą, kad betono mišinių su stiklu projektavimas ir gamyba gali atitikti standartines procedūras, kaip ir kitų įprastų betonų. Pasirinkti G20 ir G40 betono su stiklu mišiniai buvo sėkmingai pritaikyti šaligatvio projekte Kvinse, Niujorke. G20 žymėjimas reiškia betono mišinį, kuriame 20 % cemento yra pakeista maltu perdirbtu stiklo pucolanu. Straipsnyje užsiminama, kad palyginti su laboratoriskai apdorotais mėginiais, lauke paliktų cilindų mechaniniai duomenys parodė mažesnes vertes dėl sezoninio poveikio žemesnei aplinkos temperatūrai [42].



19 pav. Šaligatvio įrengimas naudojant G20 ir G40 betono mišinio sudėtis [42]

Betono su maltu stiklu taikymas realiose sąlygose leidžia ne tik sumažinti CO₂ kiekį, bet ir suteikia galimybę stebėti tokių gaminių ilgaamžiškumą už laboratorijos ribų. Tai kartu prisideda prie mokslinių tyrimų apie inovatyvias betono sudėtis ir jų praktinį pritaikomumą.

1.10. Atliktos literatūros analizės išvados

Atliktos literatūros analizės pagrindinis dėmesys buvo skiriamas malto stiklo atliekos panaudojimo galimybių vertinimui, pakeičiant dalį cemento. Tyrimuose buvo analizuojamos stiklo cheminės savybės, jo įvairių rūšių ir spalvų įtaka betono sudėčiai bei mechaninėms savybėms. Aptarta, kaip skirtingos stiklo frakcijos dalelės veikia cemento hidratacijos procesus, gniuždomąjį stiprį ir struktūros mikroformavimąsi. Daug dėmesio skirta stiklo miltelių pucolaniniam aktyvumui, jo panaudojimo efektyvumui mažinant CO₂ emisijas. Taip pat palygintas maltas stiklas su kitais aktyviais mineraliniais priedais, tokiais kaip metakaolinas ar silicio mikrodulkės.

Kita svarbi analizuota kryptis – galimos rizikos, susijusios su malto stiklo naudojimu betone ir jų išvengiamumo valdymo būdai. Literatūroje plačiai aptariama šarminės korozijos rizika, kuri kyla dėl stiklo reakcijos su cemento šarmais. Siekiant ją sumažinti, akcentuojama būtinybė kontroliuoti stiklo dalelių dydį ir cheminę sudėtį. Taip pat buvo nagrinėtas malto stiklo poveikis betono ilgaamžiškumui,

įskaitant atsparumą užšalimo ir atšilimo ciklams. Tyrimai parodė, kad tinkamai paruoštas maltas stiklas ne tik nepablogina, bet gali ir pagerinti betono atsparumą aplinkos poveikiui.

Šios išvados rodo, jog literatūros analizė suteikė tvirtesnę teorinę pagrindą eksperimentiniams tyrimams pradėti, kuriais bus siekiama plėtoti tvarius sprendimus statybinėse medžiagose.

Tyrimo trūkumai.

Nors literatūroje nagrinėjama malto stiklo, pakeičiančio dalį cemento, galimybė, vis dar trūksta išsamių eksperimentinių tyrimų, kurie vertintų jo poveikį ne tik betono mechaninėms savybėms, bet ir atsparumui šarminės korozijos bei užšalimo ir atšilimo ciklams. Taip pat stokojama bendro požiūrio į optimalų stiklo dalelių dydį bei jų cheminės sudėties įtaką šiems veiksniams.

2. Tyrimams naudotos medžiagos

Šiame skyriuje pateiktos naudotų medžiagų žinomos charakteristikos, sudėtys ir savybės.

2.1. Portlandcementis

Šiame darbe buvo naudojamas dviejų rūšių portlandcementis. CEM I 42,5 R tipo portlandcementis buvo naudojamas atlikti pusiau adiabatinius tyrimus, siekiant nustatyti kitų medžiagų daromą įtaką hidratacijos procesams. CEM I 42,5 N tipo portlandcementis buvo naudojamas visuose kituose tyrimuose, kurie toliau aprašyti šiame darbe. Gamintojo nurodyta cheminė sudėtis ir eksploatacinės savybės pateiktos atitinkamai 4 ir 5 lentelėse.

4 lentelė. Portlandcemenčio CEM I 42,5 N cheminė sudėtis

Cheminė sudėtis (%)	
Al ₂ O ₃	5,0
CaO	62,8
Fe ₂ O ₃	3,0
K ₂ O	0,8
LOI	3,7
MgO	1,5
Na ₂ O	0,3
P ₂ O ₅	0,1
SiO ₂	19,2
SO ₃	2,7
TiO ₂	0,3



20 pav. Portlandcemenčio milteliai

5 lentelė. Portlandcemenčio CEM I 42,5 N eksploatacinės savybės

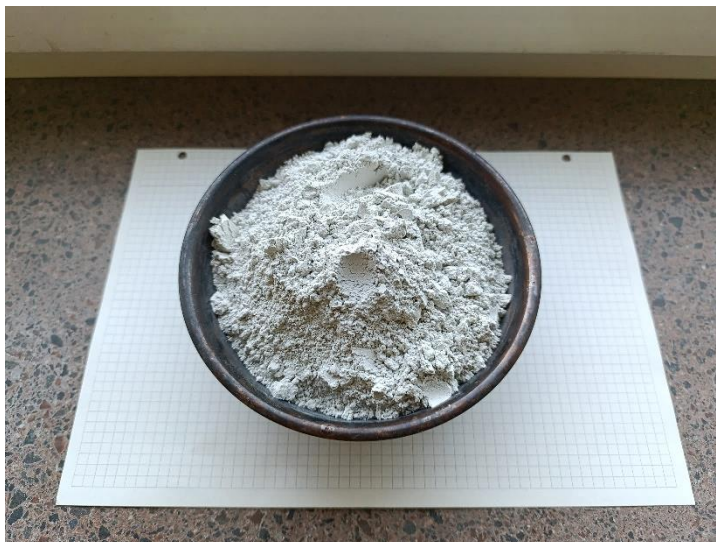
Esminės charakteristikos	Eksploatacinės savybės
Įprastiniai cementai	CEM I 42,5N
Gniuždymo stipris, MPa: ankstyvasis stipris standartinis stipris	≥ 10,0 ≥ 42,5 ≤ 62,5
Rišimosi pradžia, min	≥ 60
Tūrio pastovumas, mm	≤ 10
Kaitmenys, %	≤ 5,0
Netirpmenys, %	≤ 5,0
Sulfatų (SO ₃) kiekis, %	≤ 3,0
Chloridų kiekis, %	≤ 0,10
Šarmų kiekis, sk Na ₂ O ekv., %	≤ 0,6
C3A kiekis klinkeryje, %	≤ 3,0

2.2. Malto stiklas

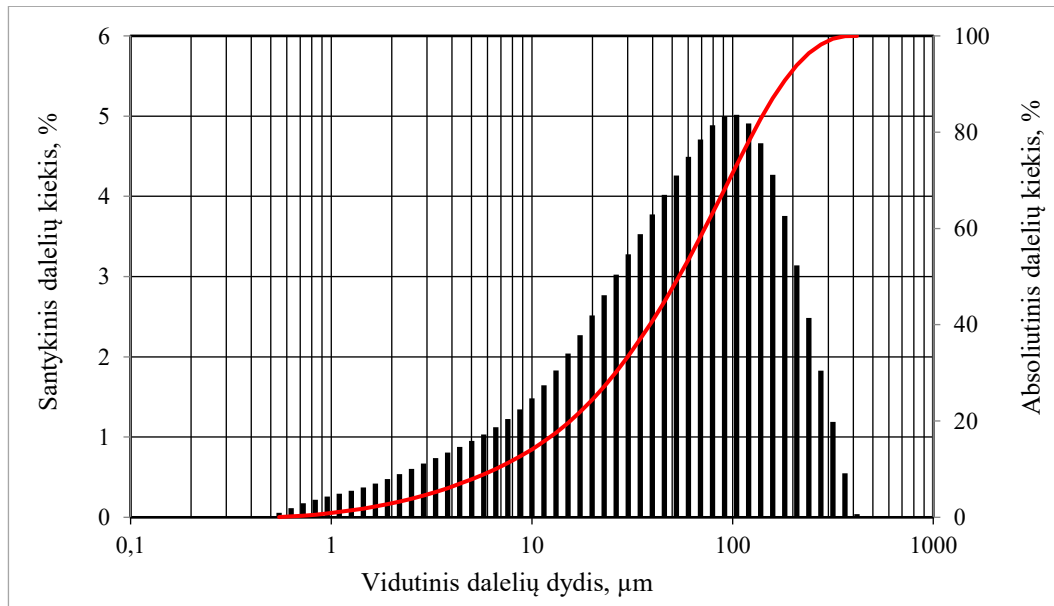
Ekologiškesnė alternatyva portlandcemenčiui pakeisti yra maltas stiklas. Tinkamai paruošta ši medžiaga gali pasižymėti pucolaninėmis savybėmis ir pagerinti rišiklio mechanines savybes ilgalaikėje perspektyvoje. Šios medžiagos praktinis panaudojimas tampa efektyvesnis jeigu atsižvelgiama į sunaudotų medžiagų išmetamą anglies dioksido kiekį į aplinką bei kokybės ir kainos santykį. Eksperimentiniams tyrimams buvo pasirinktas žalios spalvos stiklas (žr. 21 pav.).



22 pav. Malto stiklo gavybai paruošti Natrio-kalkių stiklo buteliai



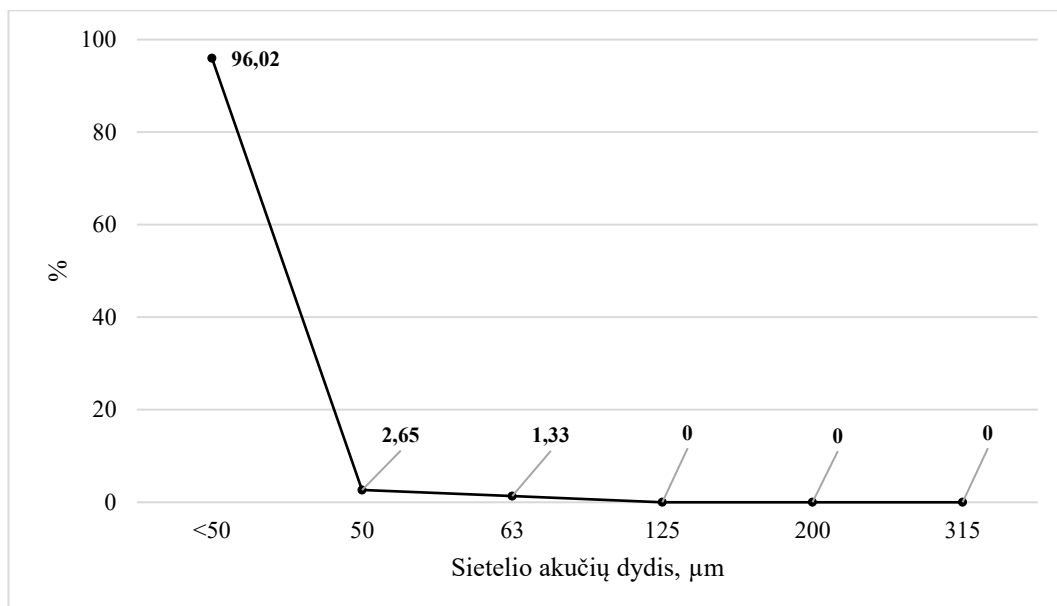
21 pav. Maltas stiklas



23 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoto malto stiklo dalelių pasiskirstymas

2.3. Maltas kvarcinis smėlis

Tyrimams naudotas maltas kvarcinis smėlis iš AB „Anykščių kvarcas“ yra gaminamas iš natūralios žaliavos, gamyboje nenaudojama jokių papildomų cheminių medžiagų. Pagal cheminę grynumą ir granulometriją tai gana aukštos kokybės žaliava [45]. Malto kvarcinio smėlio granulometrija ir savybės pateiktos 24 pav. ir 6 lentelėje.



24 pav. Malto kvarcinio smėlio dalelių dydžio pasiskirstymo kreivė [45]

6 lentelė. Malto kvarcinio smėlio dalelių dydis, cheminė sudėtis ir fizikinės savybės [45]

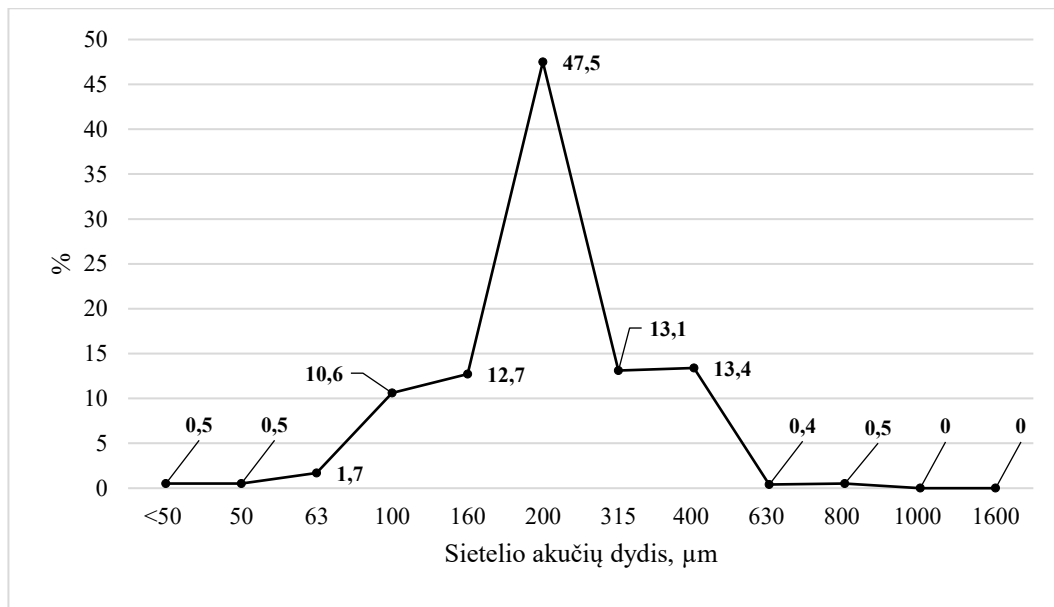
Sietelio akučių dydis, %		Metodas	Cheminė sudėtis, %	
315 μm	0,00	LST EN 933-1:2012	SiO ₂	> 98,50
200 μm	0,00		Fe ₂ O ₃	< 0,05
125 μm	0,00		Al ₂ O ₃	< 0,60
63 μm	1,33		TiO ₂	< 0,01
50 μm	2,65		Fizikinės savybės	
<50 μm	96,02		Drėgmė	< 0,3 %
Maltas kvarcinis smėlis 4/125, frakcija 0-125 μm			Lyginamasis svoris	1,03 t/m ³
			Kietumas, Moso skalė	7
			Kaitinimo nuostoliai	< 0,2 %
			Lydymosi temperatūra	1650 °C



25 pav. Maltas kvarcinis smėlis

2.4. Kvarcinis smėlis

Tyrimuose naudotas AB „Anykščių kvarcas“ kvarcinis smėlis. Džiovinintas kvarcinis smėlis 0,0-0,8 mm frakcija pagal cheminę ir granulimetrinę sudėtį yra tinkamas naudoti stiklo pramonėje, statybos srityje kaip užpildas gaminant statybinius mišinius, betoną. Šio kvarcinio smėlio granulimetrinė analizė ir savybės pateiktos 26 pav. ir 7 lentelėje.



26 pav. Kvarcinio smėlio dalelių dydžio pasiskirstymo kreivė [45]

7 lentelė. Kvarcinio smėlio dalelių dydis, cheminė sudėtis ir fizikinės savybės [45]

Sietelio akučių dydis, %		Metodas	Cheminė sudėtis, %	
1600 μm	0,0	LST EN 933-1:2012	SiO ₂	> 98,50
1000 μm	0,0		Fe ₂ O ₃	< 0,05
800 μm	0,5		Al ₂ O ₃	< 0,6
630 μm	0,4		Fizikinės savybės	
400 μm	13,4		Drėgmė	< 0,3 %
315 μm	13,1		Lyginamasis svoris	1,03 t/m ³
200 μm	47,5		Kietumas, Moso skalė	7
160 μm	12,7		Kaitinimo nuostoliai	< 0,2 %
100 μm	10,6		Lydymosi temperatūra	1650 °C
63 μm	1,7			
50 μm	0,5			
<50 μm	0,5			

2.5. Silicio mikrodulkės

Gana populiarius aktyvusis mineralinis priedas, naudojamas ypač stipriam betonui gaminti yra silicio mikrodulkės. Silicio mikrodulkės – tai metalinio silicio arba ferosilicio gamybos šalutinis produktas susidarantis aukštos temperatūros krosnyse. Dėl savo sudėties ši medžiaga pasižymi dideliu

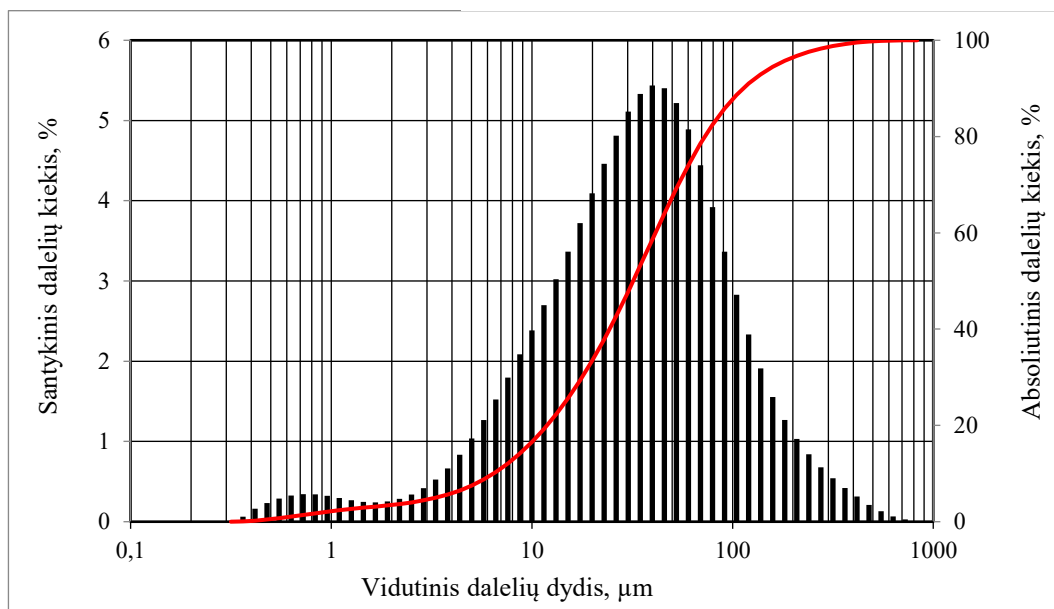
pucolaniniu efektyvumu. Piltinis tankis laisvai supiltų ir sutankintų, atitinkamai – 253 ir 327 kg/m³. Natūralus byrėjimo kampas 53 °.

8 lentelė. Silicio mikrodulkių cheminė sudėtis

Cheminė sudėtis (%)	
SiO ₂	97,60
Al ₂ O ₃	0,80
Fe ₂ O ₃	0,05
MgO	0,13
CaO	0,37
SO ₃	0,08
K ₂ O	0,19



27 pav. Silicio mikrodulkės



28 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoto silicio mikrodulkių dalelių pasiskirstymas

2.6. Superplastiklis D-190

Sika ViscoCrete-D190 – tai didelio efektyvumo betono superplastiklis, skirtas betonui ir cementiniams skiediniams. Šis superplastiklis priskiriamas prie didelės vandens redukcijos superplastiklių.

9 lentelė. Tyrimuose naudoto superplastiklio fizikinės ir cheminės savybės

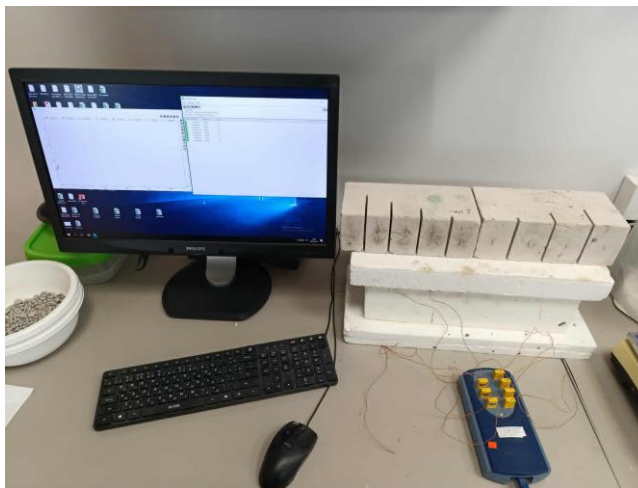
Žymėjimo paaiškinimas	Gamintojas	Tankis, g/cm ³	Vandenilio jonų koncentracija, pH	Chloridų kiekis, %	Šarmų kiekis (pagal masę), %
Sika Viscocrete-D190	UAB „Sika AG“	1,04	4,4	≤0,10	≤0,6

3. Eksperimentinėje dalyje naudotų tyrimų metodai

Šioje dalyje pateikiama eksperimentinių tyrimų atlikimo seka bei nurodomi konkrečiai tyrimuose naudoti metodai.

3.1. Cemento hidratacijos tyrimas

Šiame tyrime cemento hidratacijos procesas nagrinėjamas taikant pusiau adiabatines kalorimetrijos metodą, reglamentuotą standarto LST EN 196-9 [46].



29 pav. Pusiau adiabatines kalorimetrijos tyrimo įranga ir duomenų registravimo sistema

3.2. Betono mišinio maišymas

Norint atlikti tolimesnius tyrimus būtina kaip įmanoma tiksliau ir vienodžiau atlikti betono mišinio maišymo darbus, kad gautus rezultatus būtų galima lyginti tarpusavyje. Tokiu tikslu yra apibrėžtas ypač stipraus betono mišinio kūrimo procesas. Pirmiausia į bendrą indą reikia supilti visas reikiamas sausas birias medžiagas, tokias kaip: portlandcementis, maltas kvarcinis smėlis, kvarcinis smėlis, silicio mikrodulkės ir maltas stiklas. Šis betono mišinys maišomas su laboratorine maišykle „Automix“. Visi partijų mišiniai turi būti išmaišyti ir paruošti bandinių kietėjimui tokiu principu, kuris pateiktas 10 lentelėje.

10 lentelė. Betono mišinio maišymo procesas

Veiksmas	Trukmė
Visos pasvertos sausos birios medžiagos sudedamos į maišymo indą ir maišomos lėtu režimu.	60 sekundžių
Įpilama pusė nustatyto vandens kiekio, maišoma lėtu režimu	60 sekundžių
Įpilama pusė likusio vandens su dalimi superplastiklio, maišoma lėtu režimu	60 sekundžių
Laukiama po maišymo pabaigos	240 sekundžių
Supilamas likęs vandens kiekis su superplastikliu, maišoma lėtu režimu	60 sekundžių
Maišoma greituoju režimu iki pasiekiamo norima konsistencija	60-120 sekundžių
Paruoštas mišinys supilamas į formas	Kuo greičiau



30 pav. Betono mišinio maišytuvas „Automix“

3.3. Specifinio dalelių paviršiaus ploto nustatymo bandymas

Bleino metodas taikomas smulkių miltelių specifiniam plotui nustatyti (t. y. dalelių smulkumui). Metodo veikimo principas pagrįstas oro tekėjimo per iš anksto paruoštą smulkių miltelių sluoksnį matavimu sekundėmis.

Bandinys supilamas į specialų prietaisą – Bleino aparatą, kuriame yra cilindras, manometras ir tekėjimo sistema. Miltelių sluoksnis išlyginamas ir sutankinamas pagal LST EN 196–6 standarte nurodytas sąlygas. Tuomet per paruoštą bandinį perleidžiamas oras, o pagal slėgio pokyčius ir oro tekėjimo laiką apskaičiuojamas miltelių specifinis paviršius, kuris išreikštas cm^2/g [47].

Šis metodo veikimo principas grindžiamas logika, kad kuo smulkesnės dalelės sudaro didesnę bendrą paviršiaus plotą, todėl oro pasipriešinimas pratekėjimui padidėja.

3.4. Betono mišinio pasklidimo bandymas

Pirmiausia pradedant betono pasklidimo bandymą reikėjo pasiruošti matavimo lentą ir ritinį – jie turi būti švarūs be jokių prilipusių dalelių. Ant matavimo lentos centro padedamas ritinys, kuris užpildomas betono mišiniu iš karto po išmaišymo proceso. Ritinys atsargiai pakeliamas, leidžiant betonui laisvai pasklisti ant matavimo lentos. Po pilno mišinio sustojimo nustatomas tolimiausias betono mišinio pasklidimo atstumas nuo vieno krašto iki kito krašto. Betono mišinio pasklidimo rezultatas priklauso nuo konsistencijos. Ritinio išorinis diametras – 55 mm, vidinis diametras – 50 mm, sienutės storis – 5 mm, aukštis – 100 mm.

3.5. Lenkiamojo stiprio nustatymo bandymas

Lenkiamojo stiprio nustatymas atliktas vadovaujantis LST EN 12390-5 standarto nuostatomis [48]. Bandymui buvo naudojamos $40 \times 40 \times 160$ mm matmenų prizmės, o rezultatai įvertinti po 28 parų kietėjimo vandenyje. Prieš bandymą bandinių paviršiai buvo rankiniu būdu nušlifuoti ant akmeninio stalo, siekiant pašalinti nelygumus, o jų lygiagretumas patikrintas pagal LST EN 12390-1 reikalavimus. Lenkimo bandymui taikytas presas, kurio maksimali ašinė jėga yra 100 kN.

3.6. Gniuždomojo stiprio nustatymo bandymas

Gniuždomasis stipris nustatytas vadovaujantis LST EN 12390-4 standarto nuostatomis [49]. Bandymui buvo naudojamos prizmės, anksčiau sulenktos lenkimo bandymo metu. Ant bandinių viršaus ir apačios buvo padėtos 40×40 mm dydžio plokštelės, kurios apibrėžė gniuždomąjį plotą. Rezultatai įvertinti po 28 parų kietėjimo vandenyje. Bandymui atlikti naudotas presas, kurio maksimali ašinė jėga siekia 600 kN.

3.7. Pagreitinotos šarminės korozijos tyrimas

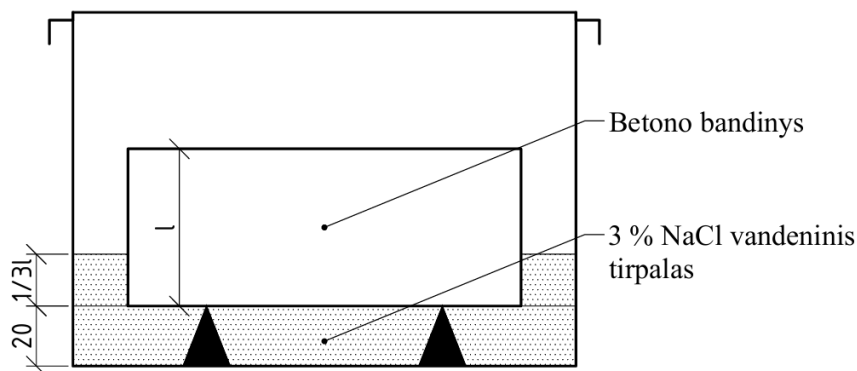
Atlikus literatūros analizę, pastebėta, kad siekiant įvertinti šarminės korozijos daromą įtaką buvo naudojamas tyrimas ASTM C1260-7. Atliekant bandymą matuojamas betono plėtimasis dėl ASR pagreitintomis aplinkos sąlygomis. Pirmiausia po formavimo bandiniai turi būti kietinami kambario temperatūroje esant 95-100 % santykinei drėgmei 24 valandas, sekančiais 24 valandas kietinami 80 °C temperatūroje vandenyje. Tuomet mėginiai 14 dienų turi būti laikomi visiškai panardinti į natrio hidroksido tirpalą, kurio 80 °C temperatūra palaikoma pastovi. Bandinių plėtimasis per šį laikotarpį turi būti stebimas ir vertinamas vadovaujantis standartais, kurie aprašyti susitraukimo deformacijų matavimo skyrelyje (3.8). Remiantis šio bandymo kriterijais didžiausias galimas bandinio išsiplėtimo dydis negali viršyti 1,00 mm/m po 14 parų.

3.8. Susitraukimo deformacijų matavimas

Betono susitraukimo deformacijų matavimas atliekamas remiantis LST EN 12390-16. Betono susitraukimo deformacijos turi būti pradėtos matuoti iškart po bandinių išformavimo. Susitraukimo deformacijoms matuoti buvo naudojamas skaitmeninis matuoklis, kurio pagrindinė savybė yra tikslumas – 0,001 mm. Tam, kad matavimai būtų patikimi, matavimo procesas yra kartojamas tris kartus ir išvedamas aritmetinis vidurkis.

3.9. Atsparumo šalčiui bandymas

Betono atsparumo šalčiui tyrimas atliekamas vadovaujantis pagal CEN/TS 12390-9:2016 „Testing hardened concrete. Deicing salts were used to test the freeze–thaw resistance“ [50]. Metodo esmė – nustatyti, kaip betonas reaguoja į pakartotinius užšaldymo ir atšildymo ciklus. Bandiniai panardinami į atskirus indus, pripildytus 3 % natrio chlorido (NaCl) tirpalu. Šaldymo kameros vieno ciklo trukmė $24 \pm 0,25$ valandos. Tyrimas tęsiamas tol, kol bandinyje pasirodo vizualiai matomų įtrūkimų, tuomet fiksuojami masės nutrupėjimai arba po 28 ciklų.



31 pav. Betono atsparumo šalčiui tyrimo schema (sudaryta autoriaus)

4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Šiame skyriuje aprašomi gauti eksperimentinių tyrimų rezultatai, kurie buvo atliekami pagal žinomus standartus KTU Statybos ir architektūros fakulteto laboratorijose.

4.1. Malto stiklo gamybos procesas

Maltas stiklas gautas naudojant laboratorijoje esantį rutulinį malūną. Pagrindiniai rutulinio malūno parametrai yra: būgno skersmuo – 700 mm, būgno ilgis – 520 mm, rutulio skersmuo – apie 63 mm, rutulio masė – apie 1000 g, rutulių skaičius malimo metu – apie 120 vnt. Kiekviename malime buvo naudotas toks pat kiekis rutulių ir toks pat kiekis stiklo atliekos.



32 pav. Malto stiklo paruošimo procesas (sudaryta autoriaus)

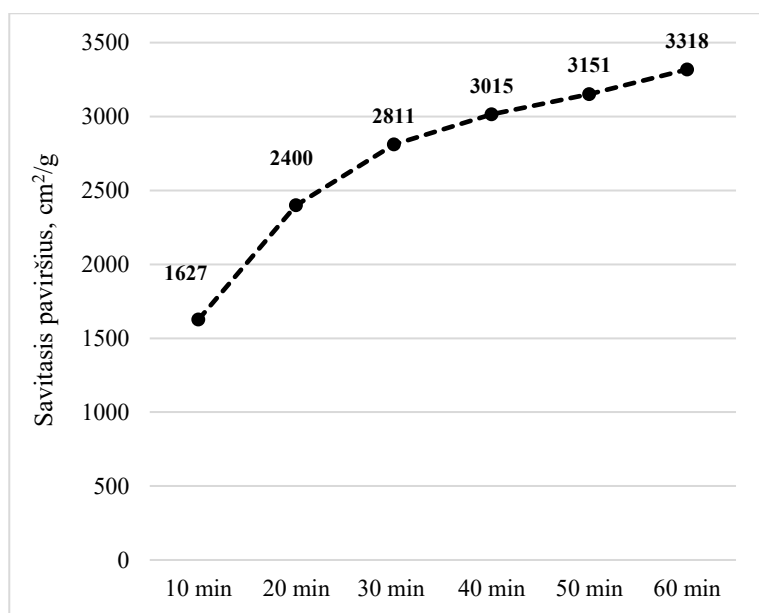
Malto stiklo paruošimas susideda iš kelių etapų: žaliavų surinkimo, jų paruošimo bei malimo proceso.

5. Žaliavų paruošimas. Pirmiausia surenkamas iš komunalinių atliekų srauto išgautas stiklas (žr. 1 numerį). Toliau jie kruopščiai nuvalomi: pašalinamos etiketės, lipdukai, kamščiai, metaliniai žiedeliai ir kiti nešvarumai (žr. 2-3 numerius);
6. Malimo proceso paruošimas. Švarūs buteliai pasveriami ir sudedami į rutulinį malūną kartu su metaliniais rutuliais, kurie veikia kaip malimo priemonė (žr. 4-7 numerius);

7. Malimo procesas. Rutuliniame malūne buteliai malami apie 60 minučių, kol gaunama vienalytė smulki stiklo masė (žr. 8 numerį);
8. Rezultatas. Malimo procesas užbaigiamas surenkant gautą maltą stiklą bei sutvarkant darbo vietą (žr. 9 numerį).

4.2. Savitojo paviršiaus tyrimo rezultatai

Maltas stiklas buvo tiriamas naudojant oro pralaidumo metodą Bleino prietaisu. Iš viso buvo paruošti šeši mėginiai, kurių malimo trukmė skiriasi kas 10 minučių intervalu. Gauti duomenys sekundėmis buvo apskaičiuojami ir konvertuojami į specifinį paviršiaus plotą. Remiantis apskaičiuotais duomenimis, sudarytas grafikas, vaizduojantis priklausomybę tarp malto stiklo dalelių smulkumo ir malimo trukmės. Šis grafikas leidžia įvertinti dalelių smulkėjimo kinetiką skirtingo malimo laiko atžvilgiu. Galima teigti, kad malimo proceso metu, didėjant malimo trukmei, jo efektyvumas mažėja – per vienodus laiko intervalus dalelių smulkumo padidėjimo (dydžio sumažėjimo) rodiklis mažėja.



33 pav. Malto stiklo savitojo paviršiaus priklausomybė nuo malimo trukmės



34 pav. Malto stiklo dalelių dydžio matavimo procesas Bleino aparatu

Norint sužinoti kada malto stiklo dalelių dydžio kitimas priartėja arti 0 reikėtų šį tyrimą prailginti ir bandyti malti stiklą ilgiau nei 1 valandą.

4.3. Pusiau adiabatiniu kalorimetrijos metodu nustatyti cemento hidratacijos rezultatai

Pusiau adiabatinio kalorimetrijos bandymo metu matuojamas temperatūros kitimas mėginyje, kurio šiluminiai nuostoliai yra riboti kaip įmanoma geriau izoliuotoje formoje. Temperatūros pokytis yra siejamas su hidratacijos reakcijų išsiskiriančia šiluma.

Šio tyrimo tikslas yra nustatyti mišinio hidratacijos šilumos išsiskyrimo evoliuciją per pirmąsias kietėjimo paras. Taip pat gavus tyrimo rezultatus galima įvertinti bandinio kietėjimo greitėjimą ir vilkinimą, palyginti mišinių sudėties daromą įtaką procesui bei įvertinti riziką dėl perkaitimo masyviuose betonuose.

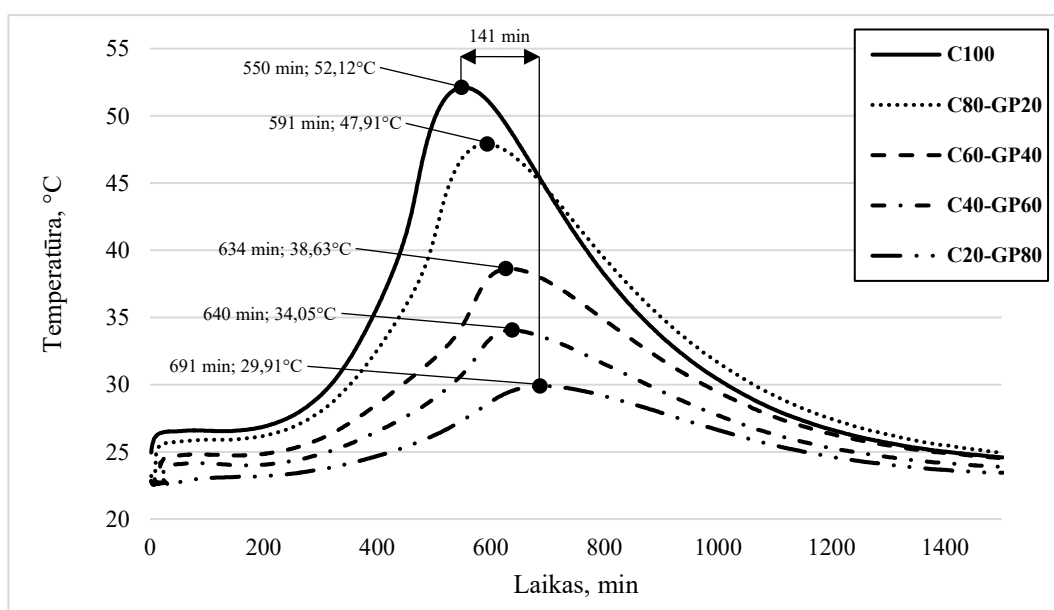


35 pav. Portlandcemenčio su maltu stiklu paruošimas hidratacijos proceso tyrimui

11 lentelė. Hidratacijos proceso tyrimo bandinių sudėtys ir žymėjimas

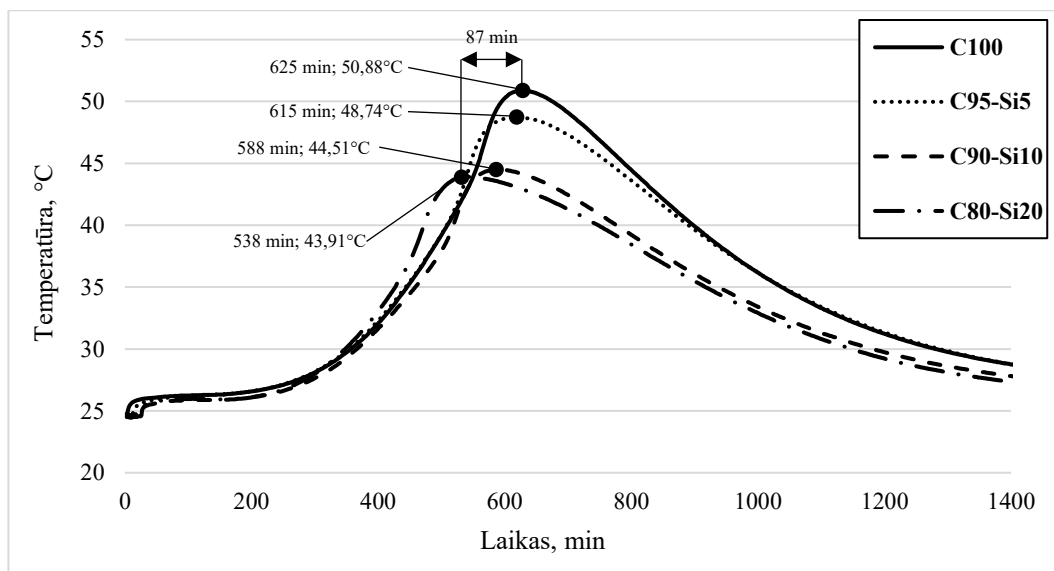
Bandinio žymuo	Bandinio sudėtis	Bandinio žymuo	Bandinio sudėtis
C100	CEM I 42,5 R 100 %	C100	CEM I 42,5 R 100 %
C80-GP20	CEM I 42,5 R 80 % Maltas stiklas 20 %	C95-Si5	CEM I 42,5 R 95 % Silicio mikrodulkės 5 %
C60-GP40	CEM I 42,5 R 60 % Maltas stiklas 40 %	C90-Si10	CEM I 42,5 R 90 % Silicio mikrodulkės 10 %
C40-GP60	CEM I 42,5 R 40 % Maltas stiklas 60 %	C80-Si20	CEM I 42,5 R 80 % Silicio mikrodulkės 20 %
C20-GP80	CEM I 42,5 R 20 % Maltas stiklas 80 %	-	-

Bandinių su maltu stiklu cemento ir vandens santykis lygus $W/C = 0,30$. O bandinių su silicio mikrodulkėmis vandens santykis lygus: $W/C = 0,55$.



36 pav. Malto stiklo įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui ($W/C = 0,30$)

36 paveikslo grafike matyti, kad didėjant malto stiklo kiekiui cemento hidratacijos pabaigos laikas ilgėja. Tarp C100 bandinio ir C20-GP80 matomas 141 minučių tarpas, kuris gali reikšti, kad naudotame maltame stikle galėjo būti dalis nešvarumų ar priemaišų. Verta paminėti, kad 39 paveikslo pavaizduotame grafike matoma netiesiškai mažėjanti temperatūra, nors sudėčių kiekiai parinkti su tiesine priklausomybe. Tikėtina, kad toks temperatūros skirtumas galėjo atsirasti dėl ne visiškai tinkamai išmaišyto mišinio, nes tai buvo atliekama rankomis. Be to, atliekant matavimus tam įtakos galėjo turėti ir termoporos vieta bandiniuose.



37 pav. Silicio mikrodulkių įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui ($W/C = 0,55$)

37 paveikslo grafike pastebėta, kad didėjant silicio mikrodulkių kiekiui cemento hidratacijos pabaigos laikas trumpėja. Tarp C100 bandinio ir C80-Si20 matomas 87 minučių tarpas, kuris reiškia, kad naudojant silicio mikrodulkes galima sutrumpinti hidratacijos pabaigos laiką. Stebint temperatūros pokyčius, pastebėta, kad didėjant silicio mikrodulkių kiekiui temperatūra hidratacijos pabaigos laike mažėja. Tačiau lyginant C90-Si10 ir C80-Si20 bandinių temperatūrų skirtumą su C100 ir C95-Si5, pastebėtas mažesnis temperatūros pokytis, nors silicio dulkių pakeitimo kiekis skiriasi dvigubai.

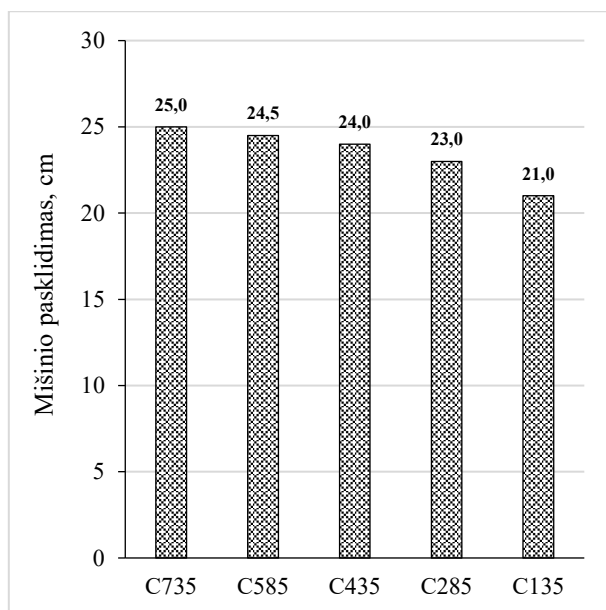
4.4. Betono mišinio pasklidimo tyrimo rezultatai

Betono mišinio pasklidimo tyrimas buvo atliekamas gaminant 160x40x40 mm matmenų prizmes. Betono bandinių (mišinio) sudėtys kilogramais į kubinį metrą (kg/m^3) pateiktos 12 lentelėje.

12 lentelė. Betono bandinių (mišinio) sudėtys

	C735	C585	C435	C285	C135
CEM I 42,5 N	735,0	585,0	435,0	285,0	135,0
Maltas kvarcinis smėlis	412,0	412,0	412,0	412,0	412,0
Kvarcinis smėlis	962,0	962,0	962,0	962,0	962,0
Silicio mikrodulkės	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
Plastifikatorius	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8
Maltas stiklas	0,0	150,0	300,0	450,0	600,0
Vanduo	183,8	183,8	183,8	183,8	183,8

Prieš pilant paruoštą mišinį į formeles, dalis mišinio buvo skirta pasklidimo tyrimui atlikti. Iš viso buvo gaminami 5 sudėčių mišiniai, kurių skirtumas yra – malto stiklo ir portlandcemenčio kiekis mišinyje. C735 prizmės sudėtyje nėra malto stiklo, o C135 yra didžiausias kiekis malto stiklo.



38 pav. Betono mišinio su malto stiklu pasklidimo priklausomybės grafikas



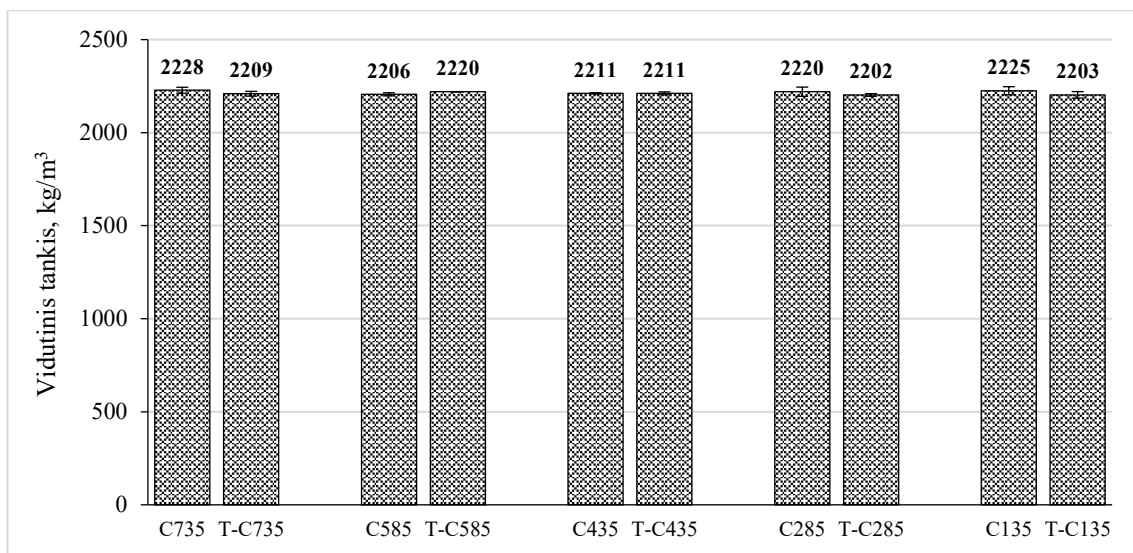
39 pav. Betono mišinio pasklidimo bandymas (C435 matavimas)

Pagal aukščiau pateiktą betono mišinių pasklidimo grafiką (žr. 38 paveikslą) matoma, kad didėjant malto stiklo kiekiui pasklidimo dydis mažėja. Nors nustatytas slankumo sumažėjimas nėra didelis, vis dėlto galima teigti, jog maltas stiklas kiek apriboja mišinio deformacijas ir apdirbamumą. Nepaisant to, mišinys išlaiko pakankamą konsistenciją praktiniam taikymui. Be to, eksperimentinių tyrimų metu nebuvo pastebėta aiškaus takumo sumažėjimo liejant mišinį į formeles.

4.5. Betono vidutinio tankio nustatymo rezultatai

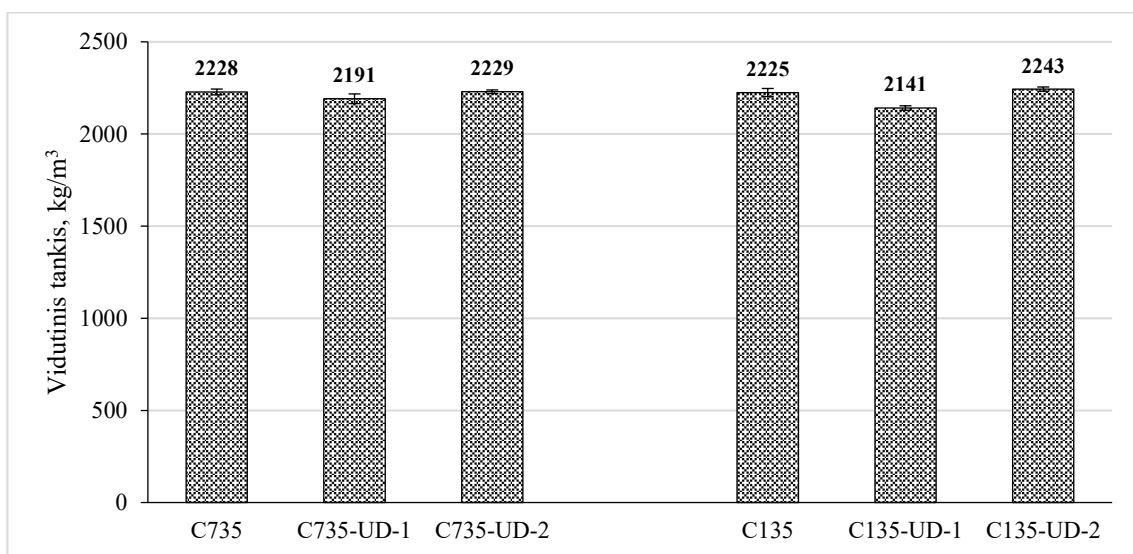
13 lentelė. Betono vidutiniai tankiai po 28 kietėjimo parų vandenyje

Bandinio žymuo	Vidutinis tankis, kg/m ³	Pastabos	Bandinio žymuo	Vidutinis tankis, kg/m ³	Pastabos
C735	2228	-	T-C735	2209	T – taikytas terminis kietinimas
C585	2206	-	T-C585	2220	
C435	2211	-	T-C435	2211	
C285	2220	-	T-C285	2202	
C135	2225	-	T-C135	2203	
C735-UD-1	2191	UD-1 – naudotas ultragarso dispergavimas tik silicio mikrodulkėms	C735-UD-2	2229	UD-2 – naudotas ultragarso dispergavimas visam mišiniui
C135-UD-1	2141		C135-UD-2	2243	



40 pav. Betono su maltu stiklu vidutinių tankių grafikas po 28 kietėjimo parų vandenyje

40 paveikslo grafike matyti nežymūs tankio svyravimai nuo 2202 kg/m³ iki 2228 kg/m³. Tokie nedideli tankio svyravimai rodo, kad visų bandinių tankiai yra labai panašūs, o skirtumas tarp jų labai mažas. Galima daryti išvadą, kad maltu stiklu pakeistas portlandcementis reikšmingos įtakos bendram medžiagos tankiui neturi. Atlikus terminį kietinimą bandiniai nepasižymėjo nei didesniu, nei mažesniu tankio svyravimu.

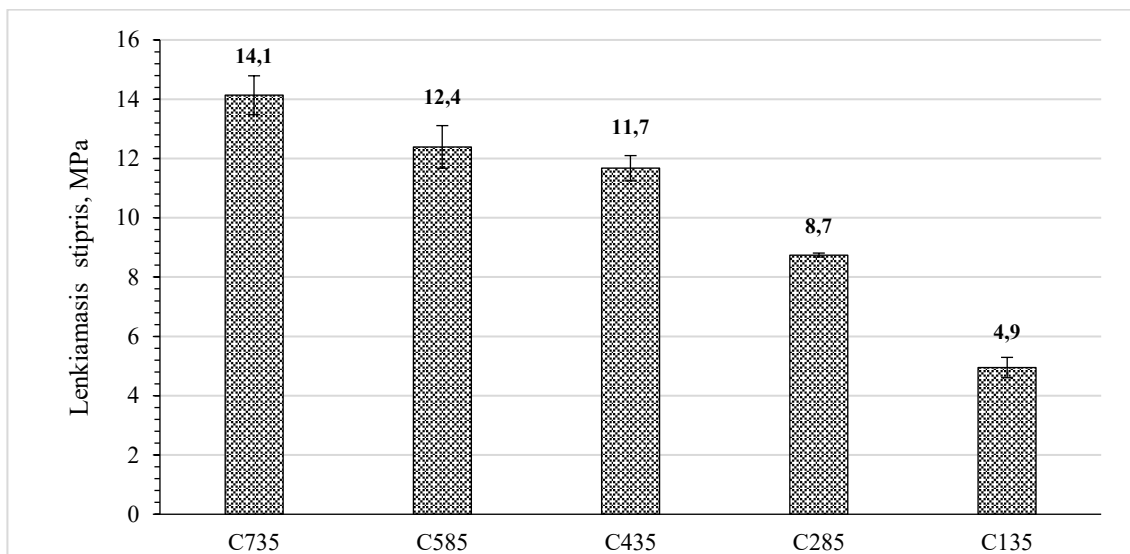


41 pav. Betono su maltu stiklu naudojant ultragarso dispergavimą vidutinių tankių grafikas po 28 kietėjimo parų vandenyje

41 paveikslo grafike matyti tankio svyravimai C735 bandinių grupėje nuo 2191 kg/m³ iki 2229 kg/m³ ir C135 bandinių grupėje nuo 2141 kg/m³ iki 2243 kg/m³. C735 bandinių grupėje pastebėti nežymūs tankio svyravimai, o C135 grupės bandiniuose tankių skirtumas šiek tiek didesnis. Ultragarso dispergavimo procesas skirtas suskaldyti smulkių dalelių aglomeratus ir mažinti poringumą, todėl būtų logiška jeigu atlikus ultragarso dispergavimą tankis šiek tiek būtų didesnis. Palyginus C735 su C735-UD-1 ir C135 su C135-UD-1 pastebima, kad silicio mikrodulkių dispergavimo procesas sumažino bandinio tankį, tačiau viso mišinio dispergavimas tankio nepablogino, bet didelio padidėjimo taip pat nepastebėta. Galima priėti išvados, kad šio tyrimo metu disperguotos silicio

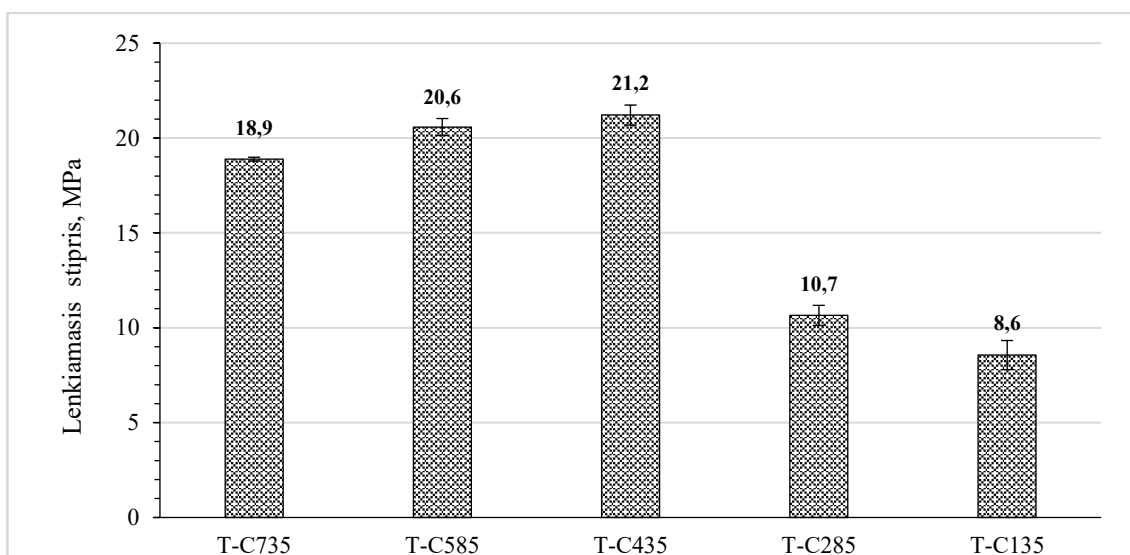
mikrodulkės sumažino betono tankį, tačiau dispergavus visą mišinį pastebimas nežymus tankio prieaugis.

4.6. Betono lenkiamojo stiprio tyrimų rezultatai



42 pav. Betono su maltu stiklu lenkiamojo stiprio priklausomybės grafikas

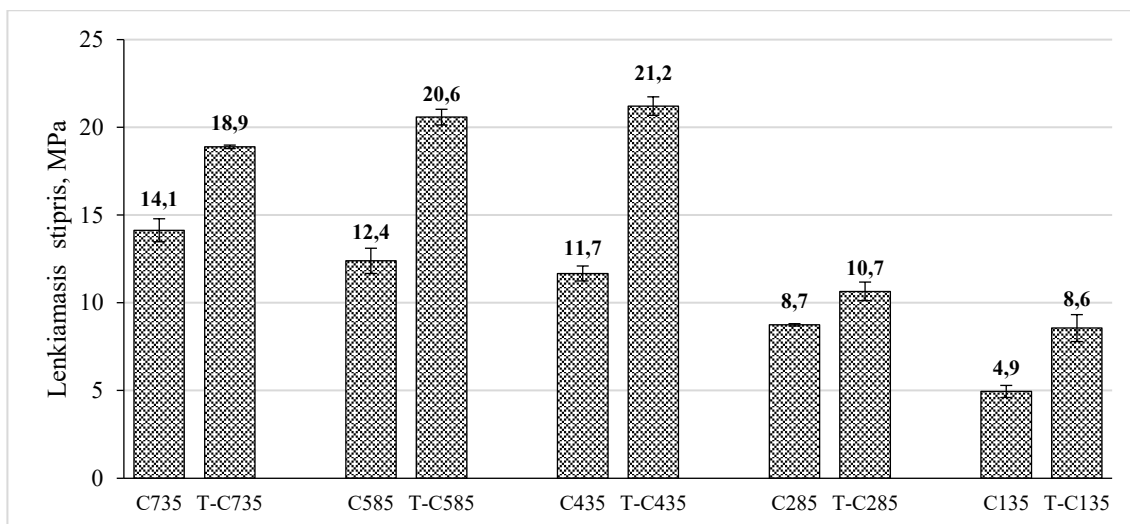
42 paveikslo grafike matomas lenkiamojo stiprio mažėjimas didėjant malto stiklo kiekiui. Taip pat pastebėta, kad lenkiamojo stiprio mažėjimas nėra tiesiškai priklausomas, nors sudėties kitimas yra kas lygią dalį – 150 kg/m^3 . Tai reiškia, kad kuo daugiau bandiniuose yra malto stiklo tuo lenkiamojo stiprio skirtumo reikšmės didėja. Pavyzdžiui, C735 lyginant su C585 skiriasi 1,7 MPa, o C285 lyginant su C135 bandiniu skiriasi 3,8 MPa.



43 pav. Betono su maltu stiklu taikant terminį kietinimą lenkiamojo stiprio priklausomybės grafikas

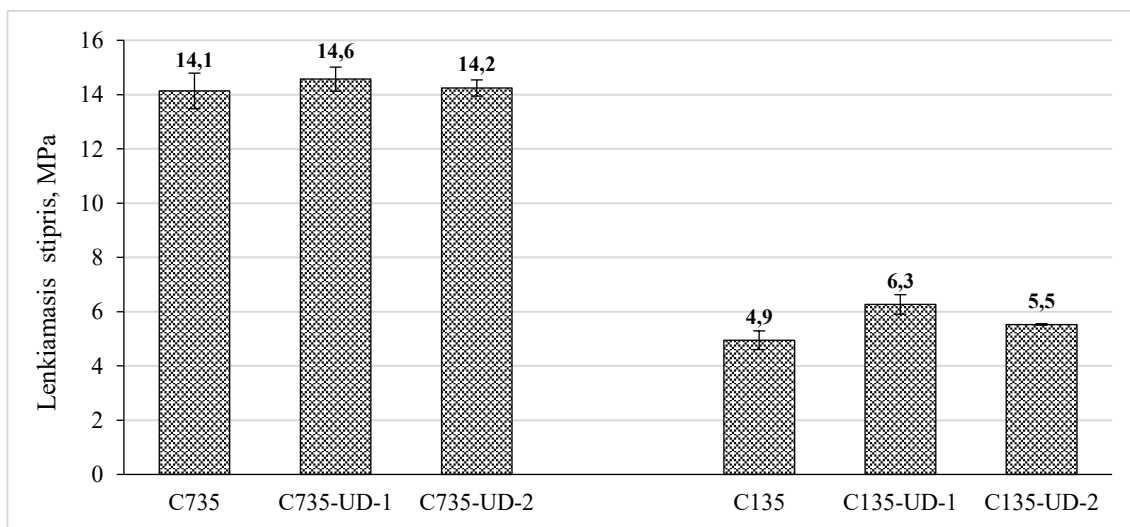
Iš 43 paveiksle pavaizduoto grafiko matyti, jog betono taikant terminį kietinimą lenkiamasis stipris didėja iki pakeičiant portlandcementį 300 kg/m^3 maltu stiklu. Lenkiamasis stipris lyginant T-C735 su T-C435 padidėja per 2,3 MPa. Tai nėra didelis lenkiamojo stiprio prieaugis, bet galima daryti išvadą, kad taikant terminį kietinimą ir pakeitus 300 kg/m^3 maltu stiklu lenkiamasis stipris nesumažėja. Staigus lenkiamojo stiprio sumažėjimas T-C285 bandinyje gali būti siejamas su mažėjančiu

portlandcemenčio kiekiu mišinyje ir atitinkamai – su sumažėjusiu kalcio hidroksido kiekiu, kuris būtinas antrinėms reakcijoms su maltu stiklu vykti. Kadangi maltas stiklas neturi tokių hidraulinių savybių kaip portlandcementis, jo didesnė dalis mišinyje negali pilnai kompensuoti rišamosios medžiagos kiekio sumažėjimo. Be to, didėjantis stiklo kiekis gali pabloginti granulimetrinę mišinio sudėtį, mažinant dalelių tarpusavio sukibimą. Dėl šių priežasčių sumažėja mišinio mikrostruktūrinis vientisumas, o tai neigiamai veikia lenkiamąjį stiprį, ypač pastebimai ties T-C285 ir T-C135 bandiniais.



44 pav. C735 – C135 ir T-C735 – T-C135 bandinių palyginamasis lenkiamojo stiprio priklausomybės grafikas

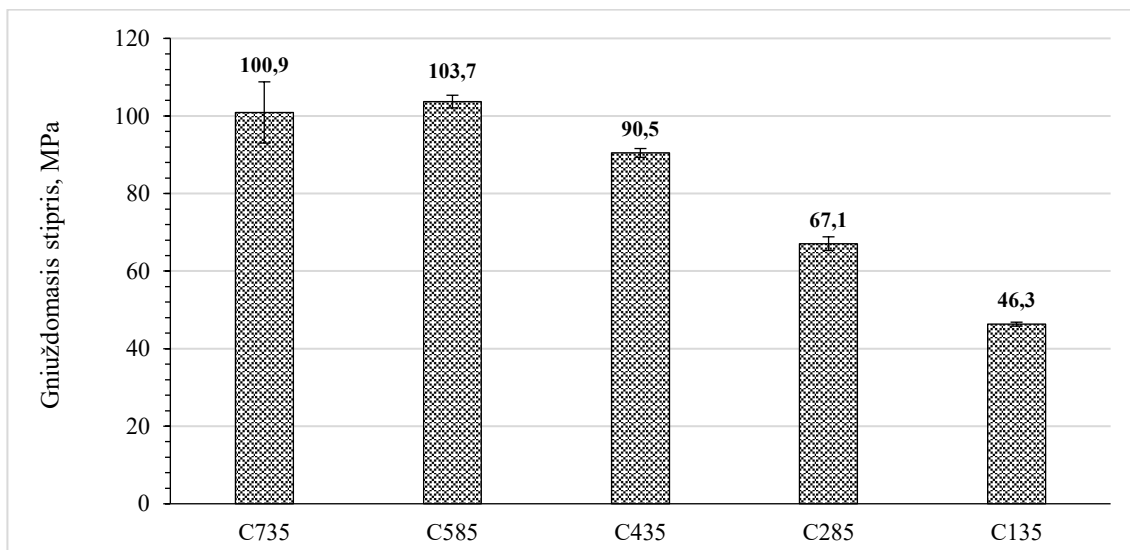
44 paveikslėlio grafike pateiktos bandinių C735 – C135 kietėjusių vandenyje ir T-C735 – T-C135 termiškai parą kietintų ir toliau vandenyje kietėjusių bandinių lenkiamasis stipris. Iš grafiko matyti, kad atlikus terminį kietinimą visų bandinių lenkiamasis stipris išauga. C735 ir T-C735 skiriasi per 4,8 MPa, o C435 ir T-C435 skiriasi per 9,5 MPa. Toks lenkiamojo stiprio prieaugis bandiniuose kuriuose yra maltas stiklas gali būti siejamas su pucolaninėmis reakcijomis. Kuomet bandiniai su maltu stiklu yra termiškai kietinami – kartu yra suaktyvinamos ir pagreitinamos pucolaninės reakcijos, kurių metų susidaro antriniai C-S-H junginiai, kurie ir suteikia bandiniams stiprumo.



45 pav. Betono su maltu stiklu naudojant ultragarso dispergavimą lenkiamojo stiprio priklausomybės grafikas

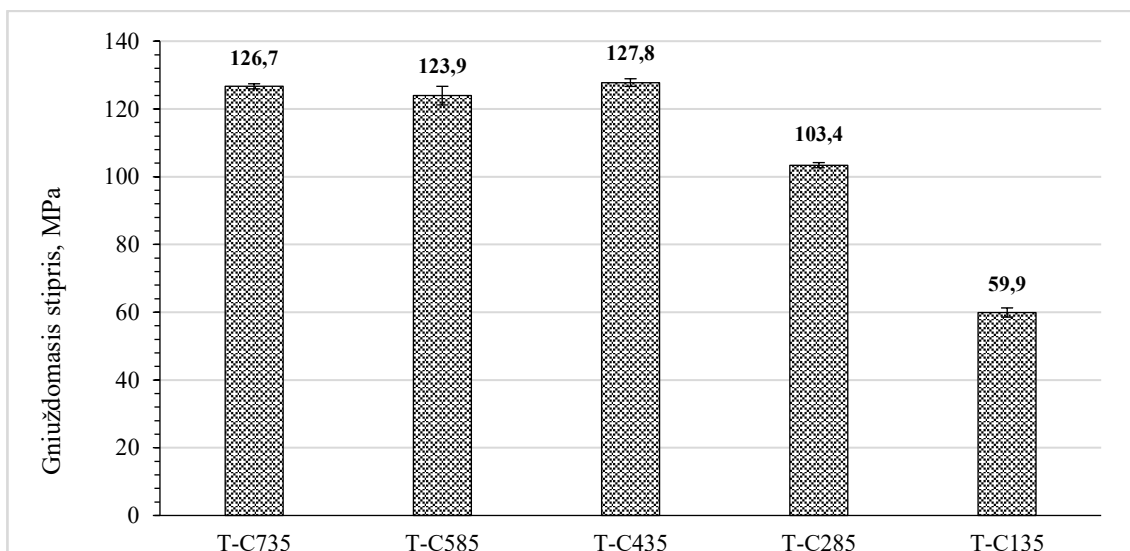
45 paveikslo pavaizduotame grafike matyti, kad atlikus ultragarso dispergavimą C735-UD-1 ir C135-UD-1 matomas nedidelis lenkiamojo stiprio prieaugis lyginant atitinkamai su C735 ir C135 bandiniais. Tokią pačią išvadą galima daryti lyginant bandinius C735 su C735-UD-2 ir C135 su C135-UD-2, tačiau pastebėtas mažesnis lenkiamojo stiprio prieaugis. Galima daryti bendrą išvadą, kad ultragarso dispergavimas nesumažina lenkiamojo stiprio, bet ir stiprio prieaugis nėra didelis.

4.7. Betono gniuždomojo stiprio tyrimų rezultatai



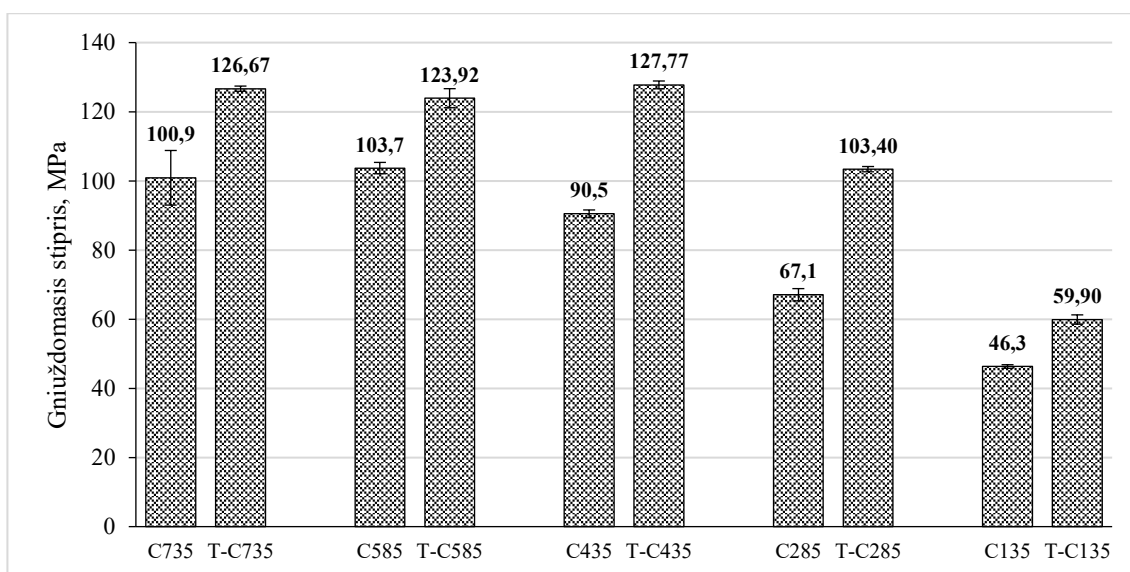
46 pav. Betono su maltu stiklu gniuždomojo stiprio priklausomybės grafikas

46 paveikslo grafike matomas gniuždomojo stiprio mažėjimas didėjant malto stiklo kiekiui nuo C585 bandinio. Lyginant be malto stiklo C735 bandinį su C585 matomas 2,8 MPa prieaugis. Toks gniuždomojo stiprio prieaugis yra labai mažas, todėl galima daryti išvadą, kad pakeitus 150 kg/m^3 portlandcemenčio maltu stiklu gniuždomasis stipris nesumažėja. Taip pat pastebėta, kad gniuždomojo stiprio mažėjimas nėra tiesiškai priklausomas, nors sudėties kitimas yra kas lygią dalį – 150 kg/m^3 . Tai reiškia, kad kuo daugiau bandiniuose yra malto stiklo tuo gniuždomojo stiprio skirtumo reikšmės didėja. Pavyzdžiui, C585 lyginant su C435 skiriasi 13,2 MPa, o C285 lyginant su C135 bandiniu skiriasi 20,8 MPa.



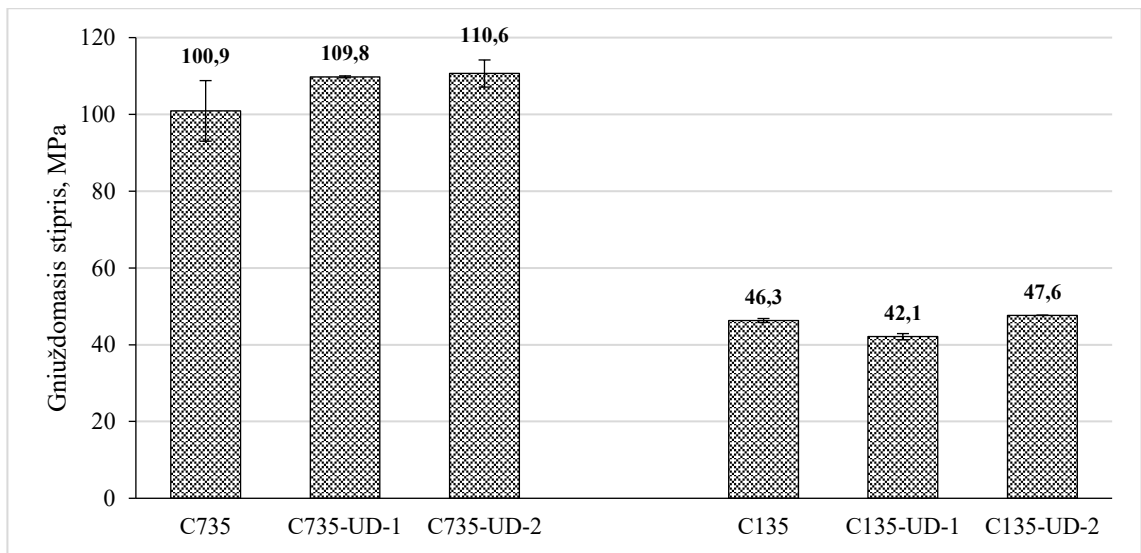
47 pav. Betono su maltu stiklu taikant terminį kietinimą gniuždomojo stiprio priklausomybės grafikas

Iš 47 paveiksle pavaizduoto grafiko matyti, jog betono taikant terminį kietinimą gniuždomasis stipris lyginant T-C735 su T-C585 sumažėja per 2,8 MPa. Tačiau lyginant T-C735 su T-C435, kuomet yra pakeičiamas portlandcementis 300 kg/m^3 maltu stiklu, gniuždomasis stipris padidėja 1,1 MPa. Toks gniuždomojo stiprio svyravimas yra santykinai labai mažas, todėl galima daryti išvadą, kad taikant terminį kietinimą ir pakeitus 300 kg/m^3 maltu stiklu gniuždomasis stipris nesumažėja. Staigus gniuždomojo stiprio sumažėjimas T-C285 bandinyje gali būti siejamas su mažėjančiu portlandcemenčio kiekiu mišinyje ir atitinkamai – su sumažėjusiu kalcio hidroksido kiekiu, kuris būtinas antrinėms reakcijoms su maltu stiklu vykti. Kadangi maltas stiklas neturi tokių hidraulinių savybių kaip portlandcementis, jo didesnė dalis mišinyje negali pilnai kompensuoti rišamosios medžiagos kiekio sumažėjimo. Be to, didėjantis stiklo kiekis gali pabloginti granulimetrinę mišinio sudėtį, mažinant dalelių tarpusavio sukibimą. Dėl šių priežasčių sumažėja mišinio mikrostruktūrinis vientisumas, o tai neigiamai veikia gniuždomąjį stiprį, ypač pastebimai ties T-C285 ir T-C135 bandiniais.



48 pav. C735 – C135 ir T-C735 – T-C135 bandinių palyginamasis gniuždomojo stiprio priklausomybės grafikas

48 paveikslėlio grafike pateiktos bandinių C735 – C135 kietėjusių vandenyje ir T-C735 – T-C135 termiškai parą kietintų ir toliau vandenyje kietėjusių bandinių gniuždomasis stipris. Iš grafiko matyti, kad atlikus terminį kietinimą visų bandinių gniuždomasis stipris išauga. C735 ir T-C735 skiriasi per 25,77 MPa, o C435 ir T-C435 skiriasi per 37,27 MPa. Toks gniuždomojo stiprio prieaugis bandiniuose, kuriuose yra maltas stiklas gali būti siejamas su pucolaninėmis reakcijomis. Kuomet bandiniai su maltu stiklu yra termiškai kietinami – kartu yra suaktyvinamos ir pagreitinamos pucolaninės reakcijos, kurių metų susidaro antriniai C-S-H junginiai, kurie ir suteikia bandiniams stiprumo.

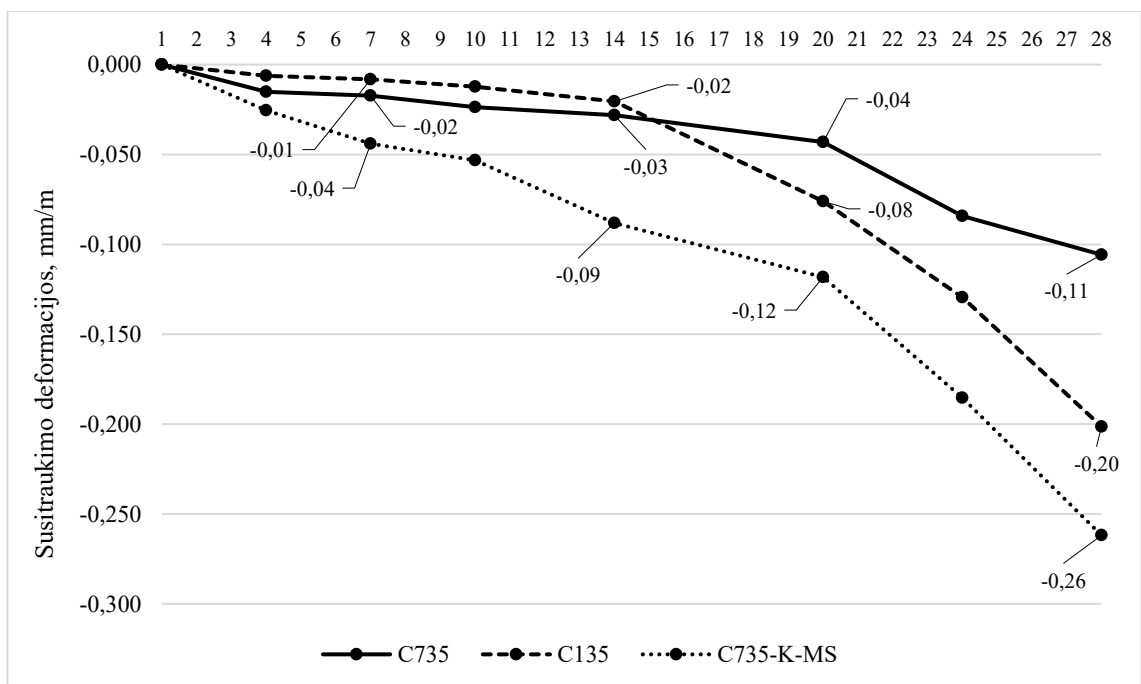


49 pav. Betono su maltu stiklu naudojant ultragarso dispergavimą gniuždomojo stiprio priklausomybės grafikas

49 paveikslo pavaizduotame grafike matyti, kad atlikus ultragarso dispergavimą C735-UD-1 matomas nedidelis gniuždomojo stiprio prieaugis lyginant su C735 bandiniu, o lyginant C135-UD-1 su C135 matomas nedidelis gniuždomojo stiprio sumažėjimas. Tačiau lyginant bandinius C735 su C735-UD-2 ir C135 su C135-UD-2, pastebėtas gniuždomojo stiprio prieaugis. Galima daryti bendrą išvadą, kad ultragarso dispergavimas nesumažina gniuždomojo stiprio išskyrus C135-UD-1, bet santykinai lyginant stiprius – prieaugis ir sumažėjimas labai mažos skaitinės vertės.

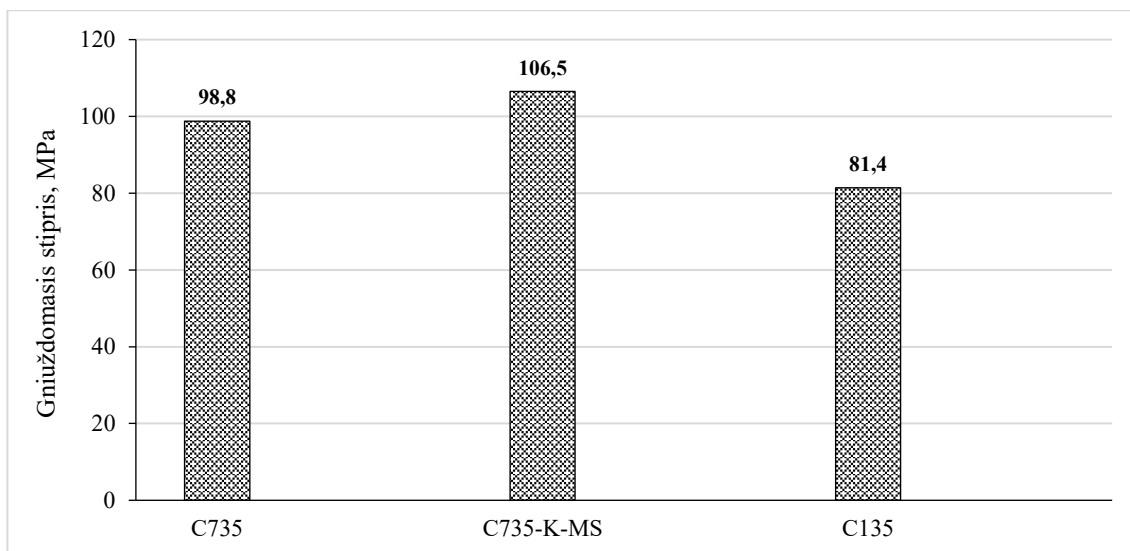
4.8. Betono pagreitinotos šarminės korozijos tyrimo rezultatai

Tiriant betono pagreitinotos šarminės korozijos atsiradimo galimybes buvo nustatinėjamos bandinių susitraukimo deformacijos 28 paras.



50 pav. Bandinių susitraukimo deformacijų kreivės

Analizuojant deformacijų kreives 50 paveikslėlyje, matyti, kad C735, C135 ir C735-K-MS bandiniai traukiasi. Tiriant pagreitinotos šarminės korozijos atsiradimo galimybes reikia matuoti bandinių išsiplėtimą, kurio maksimali reikšmė gali būti (ribinė reikšmė) – 1 mm/m. Kadangi šiuo atveju visi bandiniai traukiasi, galima daryti išvadą, kad šiuo atveju naudojant maltą stiklą šarminė korozija nepasireiškė bandiniuose. Nustatyti traukimosi rodikliai po 14 parų C735 bandinyje 0,028 mm/m, C135 – 0,021 mm/m, C735-K-MS – 0,088. Po 28 parų C735 – 0,106 mm/m, C135 – 0,201 mm/m, C735-K-MS – 0,262 mm/m.

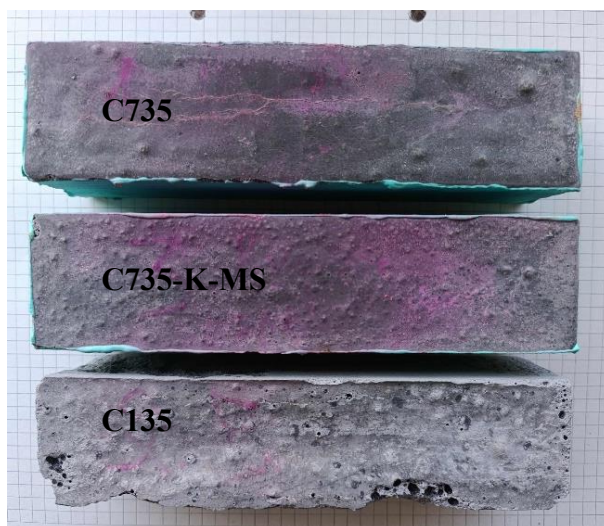


51 pav. Betono su maltu stiklu gniuždomojo stiprio grafikas po pagreitinotos šarminės korozijos tyrimo

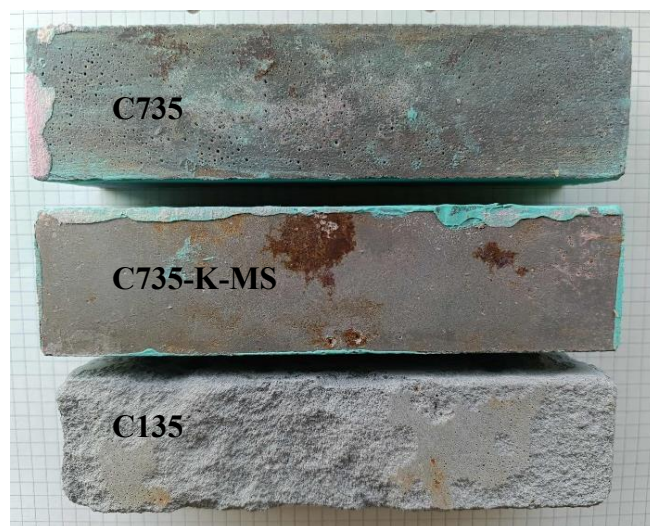
51 paveikslėlio grafike matyti, kad C735 bandinys po pagreitinotos šarminės korozijos tyrimo pasiekė 98,8 MPa gniuždomąjį stiprį, kuris yra mažesnis lyginant su C735 bandiniu, kuris kietėjo vandenyje – 100,9 MPa arba buvo termiškai kietinamas vieną parą – 126,47 MPa. Gniuždymo stiprio sumažėjimas po pagreitinoto šarminės korozijos tyrimo gali būti siejamas su terminiu bandinių poveikiu šarminėje aplinkoje. Aukštos temperatūros ir NaOH tirpalo sąveika gali sukelti cemento akmens struktūrinius pokyčius – C-S-H fazių dehidrataciją ir poringumo padidėjimą. C735-K-MS pasiekė 106,5 MPa gniuždomąjį stiprį, didesnę nei C735 – 98,8 MPa. C135 po pagreitinotos šarminės korozijos tyrimo pasiekė net 81,4 MPa, kai C135 po 28 parų kietėjimo vandenyje pasiekė vos 46,3 MPa, o termiškai kietintas vieną parą – 59,90 MPa. C135 gniuždomasis stipris po pagreitinotos šarminės korozijos padidėjo 75 % lyginant su C135 28 paras kietėjusiame vandenyje ir 35 % po terminio kietinimo vieną parą.

4.9. Betono atsparumo šalčiui vienpusiu užšaldymo ir atšildymo tyrimo rezultatai

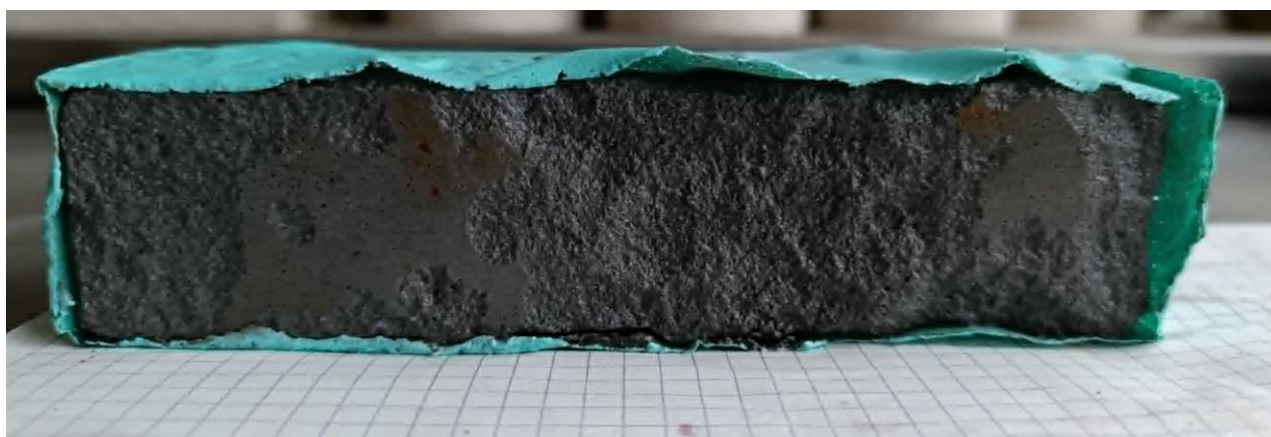
Atliekant atsparumo šalčiui vienpusiu užšaldymo ir atšildymo tyrimą buvo naudojami šie bandiniai: C735, C135 ir C735-K-MS. C735-K-MS sudėtis skiriasi nuo C735 tik tuo, kad vietoj kvarcinio smėlio buvo naudojamas toks pats kiekis malto stiklo. Sukietėję vandenyje 28 paras bandiniai buvo išdžiovinami ir visu perimetru padengti tepamąja hidroizoliacija. Pagaminus 3 % NaCl tirpalą bandiniai buvo įmerkami į tirpalą 1/3 aukščio ir padėti į ciklinę šaldymo kamerą.



52 pav. Bandinių viršaus vaizdas po 28 užšaldymo ir atšildymo ciklų



53 pav. Bandinių apačios vaizdas po 28 užšaldymo ir atšildymo ciklų

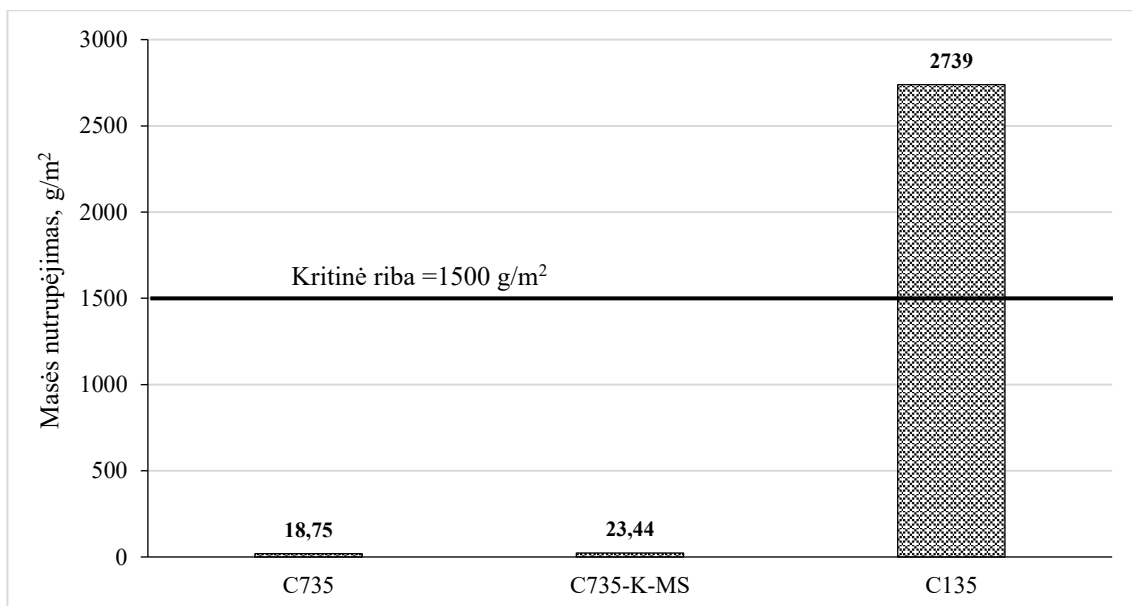


54 pav. C135 bandinio po 28 užšaldymo ir atšildymo ciklų apatinės plokštumos vaizdas

Atliekant užšaldymo ir atšildymo ciklus kas kelias dienas buvo stebima bandinių būklė. Iki 15 ciklų nebuvo pastebima visuose bandiniuose pažeidimų ar pirminių masės nutrupėjimų. Pirmieji smulkūs masės nutrupėjimai ties bandinio kraštais pastebėti C135 bandinyje po 18 ciklų. Po 23 ciklų C135 bandinyje pastebėti truputį didesni masės nutrupėjimai lyginant po 18 ciklų tačiau buvo nuspręsta toliau atlikti bandymą iki 28 ciklų. C735 ir C735-K-MS nepastebėti joki įtrūkimai ar reikšmingi masės nutrupėjimai po 28 ciklų. Kiekvieno bandinio nutrupėjusios dalelės buvo surinktos, išdžiovintos ir pasvertos, duomenys pateikti 14 lentelėje.

14 lentelė. Bandinių nutrupėjusių dalelių masės po 28 užšaldymo ir atšildymo ciklų

	C735	C735-K-MS	C135
Nutrupėjusių dalelių masės dydis į 1 m ²	18,75 g	23,44 g	2739 g



55 pav. Betono su maltu stiklu masės nutrupėjimo kiekis po 28 užšalimo ir atšilimo ciklų

Atlikus vizualinę analizę bei nutrupėjusių dalelių masės paskaičiavimus galima daryti išvadą, kad naudojant maltą sticlą pakeičiant portlandcementį 600 kg/m^3 – yra per didelis kiekis, nes viršijama $1,5 \text{ kg}$ į kv. m. nustatytoji riba.

4.10. Gaminant betoną išmetamo CO₂ kiekio palyginamieji skaičiavimai

Norint apskaičiuoti, palyginti ir įvertinti naujų betono sudėčių poveikį aplinkai, buvo apskaičiuojamos anglies dioksido emisijos. Skaičiavimai atliekami A1–A3 gyvavimo ciklui, panaudojant gamintojų deklaruojamas visuotinio atšilimo potencialo (GWP) vertes. Medžiagų gamintojų deklaruojami vienetai, suminės medžiagų GWP vertės ir nuorodos į gamintojų deklaracijas, pateiktos 15 lentelėje.

15 lentelė. Sudėtyse naudojamų medžiagų GWP reikšmės A1–A3 stadijai.

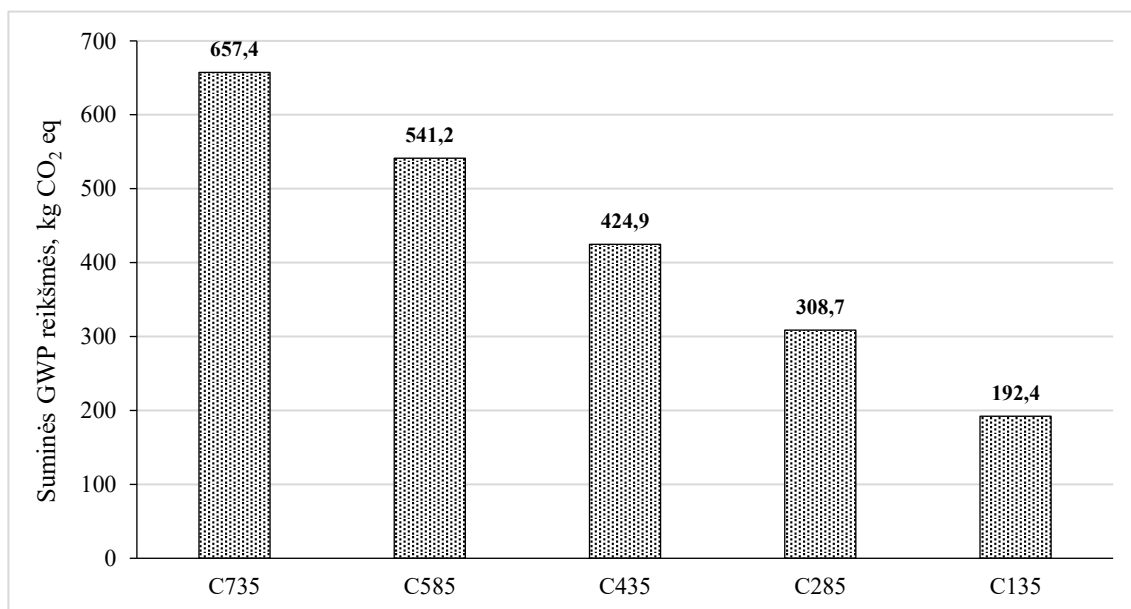
Medžiaga	Deklaruojamas vienetas	A1-A3 stadijų suminės GWP reikšmės, kg CO ₂ eq	Nuorodos į pateiktų medžiagų deklaracijas
Portlandcementis CEM I 42,5 N	1000 kg	775	https://www.environdec.com/library/epd/12571
Maltas kvarcinis smėlis	1000 kg	23,2	https://www.environdec.com/library/epd/12716
Kvarcinis smėlis	1 kg	0,00579	https://www.epddanmark.dk/media/qrljw-bkt/md-24155-da.pdf
Silicio mikrodulkės	1000 kg	569	https://www.environdec.com/library/epd/5963
Plastifikatorius	1 kg	0,444	https://www.environdec.com/library/epd/4323
Maltas stiklas	-	0	-

Skaičiavimai atlikti remiantis nurodytų bandinių sudėtimis, kurios pateiktos 12 lentelėje. Skaičiuojama kiekvienos medžiagos GWP dedamoji, norint pagaminti 1 m^3 betono. Galutiniam

rezultatui gauti susumuota kiekviena sudėties medžiaga ir gaunama GWP reikšmė. Visi dydžiai pateikti 16 lentelėje.

16 lentelė. Betono sudėčių, visuotinio atšilimo potencialo A1–A3 stadijai, reikšmės.

Bandinių žymuo	GWP reikšmė atitinkamai medžiagai, 1m ³						Suminės GWP reikšmės, kg CO ₂ eq
	CEM I 42,5 N	Maltas kvarcinis smėlis	Kvarcinis smėlis	Silicio mikrodulkės	Plastifikatorius	Maltas stiklas	
C735 (kontrolinis bandinys)	569,6	9,6	5,6	56,3	16,3	-	657,4
C585	453,4	9,6	5,6	56,3	16,3	0,0	541,2
C435	337,1	9,6	5,6	56,3	16,3	0,0	424,9
C285	220,9	9,6	5,6	56,3	16,3	0,0	308,7
C135	104,6	9,6	5,6	56,3	16,3	0,0	192,4



56 pav. C735 – C135 bandinių suminių GWP reikšmių grafikas

Atlikus skaičiavimus matoma, kad C135 sudėtyje A1-A3 stadijos metu išmetama CO₂ kiekį galima sumažinti 70,73 %, C285 – 53,05 %, C435 – 35,37 %, C585 – 17,68 %, lyginant su C735 sudėtimi, kurioje malto stiklo nėra.

Išvados

1. Baigiamojo darbo metu sukurta stiklo atliekos perdirbimo technologija, kuri sudaryta iš 4 etapų: stiklo atliekos surinkimo ir valymo, paruošimo malimui, malimo proceso iki reikiamo malto stiklo dalelių dydžio ir žaliavos surinkimo. Malto stiklo optimalus laikas nenustatytas.
2. Nustatyta, kad pakeičiant dalį portlandcemenčio maltu stiklu, rišimosi laikas ilgėja lyginant su mišiniu be malto stiklo. Mišinio, kuriame panaudota 80 % malto stiklo, rišimosi laikas pailgėjo 141 minutę, o hidratacijos pabaigos temperatūra sumažėjo 22,21 °C.
3. Atlikus lenkimo ir gniuždymo bandymus buvo nustatytos mechaninės bandinių savybės. Nustatyta, kad didėjant malto stiklo kiekiui ir atitinkamai mažėjant portlandcemenčiui, lenkiamasis ir gniuždomasis stipriai mažėja. Lyginant C735 bandinius su C135, lenkiamasis ir gniuždomasis stipriai sumažėjo atitinkamai 65,2 % ir 54,1 %. Taikant terminį kietinimą C735 ir C135 bandinius lyginant su T-C735 ir T-C135, lenkiamasis stipris padidėjo atitinkamai 34,1 % ir 75,5 %, o gniuždomasis stipris padidėjo atitinkamai 25,6 % ir 29,4 %. Taip pat buvo atliktas lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio palyginimas su bandiniais, kuriems buvo atliktas ultragarso dispergavimas. Nustatyta, kad taikant ultragarso dispergavimą, gniuždomąjį stiprį galima padidinti iki 10 %, o lenkiamąjį – iki 28 %. Apskaičiuotas bandinių tankis svyravo iki 100 kg/m³, ir nepastebėta tikslių sąsajų su bandinių stipriais. Atlikus pagreitinotos šarminės korozijos tyrimą ir apskaičiavus susitraukimo deformacijas nustatyta, kad bandiniuose šarminė korozija nepasireiškė.
4. Atlikus betono atsparumo šalčiui (paviršiniu šaldymu) bandymą, nustatyta jog po 28 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale, bandiniuose, kurių sudėtyje nebuvo sumažintas portlandcemenčio kiekis, nepastebėta jokių vizualių paviršiaus struktūros pokyčių. Tačiau didžiausias paviršiaus struktūros pokytis matomas C135 bandinyje, kurio sudėtyje buvo daugiausia malto stiklo. Apskaičiuota, kad C735 bandinys prarado 18,75 g/m², C735-K-MS prarado 23,44 g/m², O C135 net 2739 g/m².

Literatūros sąrašas

1. BARAUSKAS, Irmantas. KTU chemikas Irmantas Barauskas: geresnio pasaulio statymas naudojant „žaliąjį“ cementą. *KTU naujienos*. 2021. [žiūrėta 2025-03-20]. Prieiga per internetą: <https://ktu.edu/news/irmantas-barauskas-geresnio-pasaulio-statymas-naudojant-zaliaji-cementa/>
2. UNESDA Soft Drinks Europe. Collection rates of glass containers for recycling in Europe. 2022 data. [žiūrėta 2025-03-20]. Prieiga per internetą: <https://unesda.eu/our-priorities/collection-rates-of-glass-containers-for-recycling/>
3. EUROSTAT. Packaging waste statistics. Eurostat Statistics Explained 2024. [žiūrėta 25-04-24]. Prieiga per internetą: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics
4. Aplinkos apsaugos agentūra. Pakuočių atliekos. Atliekų apskaitos duomenys. [žiūrėta 2025-04-24]. Prieiga per internetą: https://aaa.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/atliekos/atlieku-apskaita/atlieku-apskaitos-duomenys/pakuociu-atliekos/?utm_source=chatgpt.com
5. POUDEL, Sushant, et al. Waste Glass as Partial Cement Replacement in Sustainable Concrete: Mechanical and Fresh Properties Review. *Buildings* 2025, 15(6), p. 857. Available from: <https://doi.org/10.3390/buildings15060857>. DOI 10.3390/buildings15060857.
6. MOHAJERANI, Abbas, et al. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, Dec, 2017, vol. 156. pp. 443-467. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005>. CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005
7. DOBISZEWSKA, Magdalena, et al. Effect of Glass Powder on the Cement Hydration, Microstructure and Mechanical Properties of Mortar. *Material proceedings*, Feb, 2023, 13, 40. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/materproc2023013040>. DOI:10.3390/materproc2023013040.
8. IBRAHIM, Saber ir Amr MEAWAD. Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, Sep, 2018, vol. 182. pp. 451-458. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.119> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.119.
9. CHEN, Yulin, et al. Effect of glass powder on alkali-silica reaction mitigation for tunnel waste rock slag in concrete. *Journal of Building Engineering*. December, 2024, vol. 98. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111024> CrossRef ISSN 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111024.
10. KADRI, El-Hadj, et al. Combined Effect of Chemical Nature and Fineness of Mineral Powders on Portland Cement Hydration. *Materials and Structures*, Jan, 2010. Available from: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-009-9519-6> DOI: 10.1617/s11527-009-9519-6
11. CHANG, Xiaolin, et al. Influence of Glass Powder on Hydration Kinetics of Composite Cementitious Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, October, 2015. Available from: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/713415> DOI: 10.1155/2015/713415.
12. WANG, Xiao-Yong, et al. A multi-phase kinetic model to simulate hydration of slag–cement blends. *Cement and Concrete Composites*, volume 32, issue 6, 2010, Pages 468-477. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.006>. CrossRef. ISSN 0958-9465. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.03.006.

13. BARKAUSKAS, Kęstutis. Cementinio kompozito su metakaolino ir stiklo atliekomis atsparumo šarminei korozijai tyrimai. Vilnius Gedimino technikos universitetas. Daktaro disertacija. 2023. Available from: <https://doi.org/10.20334/2023-007-M> DOI 10.20334/2029-007-M.
14. LOPES BORGES, Alexandre, et al. Evaluation of the Pozzolanic Activity of Glass Powder in Three Maximum Grain Sizes. *May, 2021*. Available from: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2020-0496> DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2020-0496.
15. KALAKADA, Z., J. H. DOH ir G. ZI. Utilisation of coarse glass powder as pozzolanic cement—A mix design investigation. *Construction and Building Materials, April, 2020, vol. 240*. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117916> CrossRef ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117916.
16. BOREK, K., P. CZAPIK ir R. DACHOWSKI. Recycled Glass as a Substitute for Quartz Sand in Silicate Products. *Materials, February, 2020*. Available from: <https://doi.org/10.3390/ma13051030> DOI: 10.3390/ma13051030.
17. SHI, Caijun, et al. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research, May, 2005, vol. 35, pp. 987-993*. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015> CrossRef. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2004.05.015.
18. KHMIRI, A., M. CHAABOUNI ir B. SAMET. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials, July, 2013, vol. 44, pp. 74-80*. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040
19. SCHWARZ, Nathan, et al. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement & Concrete Composites, July, 2008, vol. 30, pp. 486-496*. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001> CrossRef ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001
20. ZHENG, K. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkaliesilica reaction. *Cement and Concrete Composites, March, 2016, vol. 67, pp. 30-38*. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008> CrossRef. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008.
21. ISSIAKA, S., et al. EVALUATION OF THE POZZOLANIC ACTIVITY OF METAKAOLIN, GLASS POWDER AND SILICA POWDER FOR USE IN CEMENTITIOUS MORTARS. *Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia, 2024, vol. 2024, issue 4, Pages 49-66*. Available from: DOI: <http://dx.doi.org/10.24193/subbchem.2024.4.04> DOI: 10.24193/subbchem.2024.04.04
22. GUIGNONE, G., et al. Incorporation of glass powder and metakaolin as cement partial replacement to improve concrete mechanical properties and increase service life. *Journal of Composite Materials, Feb, 2020*. Available from: <http://dx.doi.org/10.1177/0021998320906873>. DOI: 10.1177/0021998320906873.
23. MALAIŠKIENĖ, J. ir R. JOKUBOVSKIS. Influence of Pozzolanic Additives on the Structure and Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *Materials, 2025, 18, 1304*. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/ma18061304> DOI: 10.3390/ma18061304.
24. AMER, A., ir S. EL-HOSEN. Properties and performance of metakaolin pozzolanic cement pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017*. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-017-6087-9>. DOI: 10.1007/s10973-017-6087-9.

25. AHMAD, Omar Asad. Production of High-Performance Silica Fume Concrete. *American Journal of Applied Sciences*, 2017. Available from: <http://dx.doi.org/10.3844/ajassp.2017.1031.1038> DOI: 10.3844/ajassp.2017.1031.1038.
26. ABBAS, S. Preventive Measures of Alkali–Silica Reaction in Concrete Buildings: Use of Hybrid Waste Coal Ash and Steel Wire Cut Fibers. *Buildings*. March, 2023. Available from: <https://doi.org/10.3390/buildings13030710> DOI: 10.3390/buildings13030710.
27. ALMAKRAB, A., et al. Assessment of Various Mitigation Strategies of Alkali-Silica Reactions in Concrete Using Accelerated Mortar Test. *Materials*, 2024, 17(20), 5124. Available from: <https://doi.org/10.3390/ma17205124>. DOI: 10.3390/ma17205124.
28. AFSHINNIA, K., ir P. RANGARAJU. Mitigating Alkali-Silica Reaction in Concrete- Effectiveness of Ground Glass Powder from Recycled Glass. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, December 2015. Available from: <http://dx.doi.org/10.3141/2508-08>. DOI: 10.3141/2508-08.
29. GUANG, D., et al. Study on the Effect and Mechanism of Alkali–Silica Reaction Expansion in Glass Concrete. *Sustainability*, Sep, 2021. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/su131910618>. DOI: 10.3390/su131910618.
30. KE, G., et al. Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali–Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, December, 2018. Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s40069-018-0299-7> DOI: 10.1186/s40069-018-0299-7.
31. MAHMOOD, A., et al. The efficiency of recycled glass powder in mitigating the alkali-silica reaction induced by recycled glass aggregate in cementitious mortars. *Materials and Structures*, 2022. Available from: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-022-01989-7>. DOI: 10.1617/s11527-022-01989-7.
32. KRSTIC, M., et al. Freeze–Thaw Resistance and Air-Void Analysis of Concrete with Recycled Glass–Pozzolan Using X-ray Micro-Tomography. *Materials*, December 2020. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14010154> DOI: 10.3390/ma14010154.
33. JURCZAK, R., et al. Effect of Ground Waste Glass Addition on the Strength and Durability of Low Strength Concrete Mixes. *Materials*, 2021, 14(1), 190. Available from: <https://doi.org/10.3390/ma14010190>. DOI: 10.3390/ma14010190.
34. GRDIC, D.Z., et al. Durability Properties of Concrete Supplemented with Recycled CRT Glass as Cementitious Material. *Materials*, 2021, 14(16), 4421. Available from: <https://doi.org/10.3390/ma14164421> DOI: 10.3390/ma14164421.
35. NASSAR, Roz-Ud-Din ir Parviz SOROUSHIAN. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials*, 2012, volume 29, Pages 368-377. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061
36. ABELLAN-GARCIA, J., et al. ANOVA-guided assessment of waste glass and limestone powder influence on ultra-high-performance concrete properties. *Case Studies in Construction Materials* July, 2024, vol. 20 Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03231> CrossRef ISSN 2214-5095. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03231.
37. HAMADA, H., et al. Effect of recycled waste glass on the properties of high-performance concrete: A critical review. *Case Studies in Construction Materials*, December, 2022, vol. 17.

- Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01149> CrossRef ISSN 2214-5095. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01149.
38. REDONDO-PEREZ, N. M., et al. A Comprehensive Overview of Recycled Glass as Mineral Admixture for Circular UHPC Solutions. *Sustainability*, June, 2024. Available from: <https://doi.org/10.3390/su16125077> DOI: 10.3390/su16125077.
 39. ANJALI BALAN, L., B.R. ANUPAM ir S. SHARMA. Thermal and mechanical performance of cool concrete pavements containing waste glass. *Construction and Building Materials*, July, 2021, vol. 290. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123238> CrossRef ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123238.
 40. GOLEK, L. Utilization of ground waste glass cullet in the industrial production of precast concrete elements. *Cement Wapno Beton*, June, 2021. Available from: <https://doi.org/10.32047/CWB.2021.26.2.6> CrossRef 1425-8129. DOI: 10.32047/CWB.2021.26.2.6
 41. TAMAYO-GARCIA, B., et al. Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate. *Buildings*, June, 2019. Available from: <https://doi.org/10.3390/buildings9060145> DOI: 10.3390/buildings9060145.
 42. KRSTIC, M. ir J. F. DAVALOS. Field Application of Recycled Glass Pozzolan for Concrete. *Materials*, July, 2019, vol. 116. Available from: <http://dx.doi.org/10.14359/51716716> CrossRef ISSN 123-131. DOI: 10.14359/51716716.
 43. NASSAR, Roz-Ud-Din, et al. Long term field performance of concrete produced with powder waste glass as partial replacement of cement. *Case Studies in Construction Materials*, December, 2021, vol. 15. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00745> CrossRef ISSN 2214-5095. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00745.
 44. GUIGNONE, G., et al. Life Cycle Assessment of Waste Glass Powder Incorporation on Concrete: A Bridge Retrofit Study Case. March, 2022. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/app12073353> DOI: 10.3390/app12073353
 45. ANYKŠČIŲ KVARCAS. Žiūrėta 2025-09-21. Prieiga per internetą: <https://www.akvarcas.lt/produktai>.
 46. LST EN 196-9:2010. Cemento bandymų metodai. 9 dalis. Hidratacijos šiluma. Prieiga per internetą: https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=primo&id=702501
 47. LST EN 196-6:2019. Cemento bandymų metodai. 6 dalis. Smulkumo nustatymas. Prieiga per internetą: https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=primo&id=1306787
 48. LST EN 12390-5:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris.
 49. LST EN 12390-4:2000. Betono bandymas. 4 dalis. Stipris gniuždant. Bandymo mašinų techniniai reikalavimai. Prieiga per internetą: https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=primo&id=1338870
 50. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. CEN/TS 12390-9:2016 Testing hardened concrete. De-icing salts were used to test the freeze–thaw resistance [interaktyvus]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016 [žiūrėta 2025-09-13]. Prieiga per: <https://www.intertekinform.com/preview/256773925953.pdf?sku=880176> SAIG NSAI NSAI_2091

Priedai

1 priedas. DI naudojimo deklaracija

Dirbtinio intelekto įrankis „ChatGPT“ nebuvo naudojamas šiame darbe.

2 priedas. „Smart Build Environmental“ konferencija

