



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Savaime sutankėjančio betono savybių, panaudojant
dispersines elektronines atliekas, tyrimai**

Baigiamasis magistro projektas

Augustas Šiuša

Projekto autorius

Doc. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Savaime sutankėjančio betono savybių, panaudojant dispersines elektronines atliekas, tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Augustas Šiuša

Projekto autorius

Doc. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

Vyresn. Lekt. Gintaris Cinelis

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Augustas Šiuša

Savaime sutankėjančio betono savybių, panaudojant dispersines elektronines atliekas, tyrimai

Akademinio 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.

Augustas Šiuša

Patvirtinta elektroniniu būdu



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: 6211EX008 Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija	
Baigiamojo projekto tema (tematika, lietuvių k.): Savaime susitankinančio betono struktūros įtakos technologinėms ir ilgaamžiškumo savybėms tyrimai.	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-35 (2025-12-01)	
(lietuvių k.): Savaime sutankėjančio betono savybių, panaudojant dispersines elektronines atliekas, tyrimai.	
(anglų k.): Investigation of the Properties of Self-Compacting Concrete Using Dispersed Electronic Waste.	
Pradiniai duomenys darbui: Sijotos dispersinės kleskopų atliekos, kuriomis keičiant dalį cemento pagaminti savaime sutankėjančią betoną. Keičiamas atliekų kiekis 10, 15 % cemento masės.	
Kita papildoma su užduotimi susijusi informacija (pagal poreikį):	
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):	
Ketvirtadienis, 15:30 val.	

Vadovas:	Doc. Dr. Ernestas Ivanauskas
(indėlis 100 %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Augustas Šiuša
	<i>vardas, pavardė</i>
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Šiuša, Augustas. Savaime sutankėjančio betono savybių, panaudojant dispersines elektronines atliekas, tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Ernestas Ivanauskas; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: savaime susitankinantis betonas, stiklo atliekos, ilgaamžiškumo tyrimai, tvarumas.

Kaunas, 2026. 57 p.

Santrauka

Baigiamajame projekte nagrinėjama, ar maltas elektronikos atliekų stiklas, naudojamas kaip dalinis portlandcemenčio pakaitalas, gali būti pritaikytas savaime susitankinančiame betone, nepabloginant jo technologinių, mechaninių ir ilgaamžiškumo savybių. Tyrimo tikslas – nustatyti optimalų portlandcemenčio pakeitimo maltomis elektronikos atliekų stiklo dalelėmis santykį, kuris užtikrina savaime susitankinančio betono C30/37–XC2–XF3–XA1–SF1 klasės mechaninių ir slankumo savybių atitikimą norminiams reikalavimams ir kartu prisideda prie CO₂ emisijų bei elektronikos atliekų kiekio mažinimo.

Tyrimo uždaviniai:

1. nustatyti optimalią malto elektroninių atliekų (EA) stiklo dalelių malimo trukmę, atsižvelgiant į dalelių dydį ir tariamąjį tankį;
2. įvertinti skirtingo malto elektroninių atliekų (EA) stiklo kiekio įtaką hidratacijos šilumos išsiskyrimo intensyvumui ir greičiui;
3. ištirti malto elektroninių atliekų (EA) stiklo dalelių dydžio poveikį cemento tešlos ir akmens savybėms;
4. nustatyti malto elektroninių atliekų (EA) stiklo įtaką betono technologinėms, fizikinėms ir mechaninėms savybėms: tankiui, stipriui gniuždant, atsparumui šalčiui;
5. palyginti betono gaminių, pagamintų naudojant skirtingus stiklo atliekų rišiklyje, santykius, mechanines savybes ir nustatyti optimalų atliekų rišiklyje santykį, vertinant betono mišinių konsistencijos pokytį ir jų tinkamumą naudoti kaip savaime susitankinantį betoną SSB.

Tyrime naudotas iš kineskopinių televizorių gautas stiklas, sumaltas trimis režimais ir išvalytas nuo plastiko priemaišų. Nustatytas stiklo miltelių tariamasis tankis. Suprojektuotos trys betono sudėtys: kontrolinė be stiklo ir dvi, kuriose 10 ir 15 % rišiklio masės pakeista EA stiklu, išlaikant V/C santykį ir vienodas cheminių priedų dozes. Šviežio betono savybės tirtos nustatant tankį, oro kiekį, pasklidą ir rišiklio hidrataciją. Sukietėjęs betonas vertintas pagal gniuždomąjį stiprį, poringumą, prognozuojamą atsparumą šalčiui ir kapiliarinio užšalimo–atšilimo bandymą.

Nustatyta, kad smulkiausiai (<50 μm) sumaltas ir nuo plastiko išvalytas stiklas yra tinkamiausias tolesniam naudojimui. Didėjant EA stiklo kiekiui, mažėja hidratacijos šilumos pikas ir pailgėja jo pasiekimo laikas. Visi betonai po 28 parų viršijo C30/37 klasės stiprio reikalavimus. 10 % EA stiklo mišinys pilnai atitiko SF1 klasės SSB pasklidos reikalavimus. Nustatyta, kad 10 % cemento pakeitimas maltu EA stiklu yra optimalus sprendinys SSB gamybai, užtikrinantis reikiamą slankumą, didesnę stiprį ir tvarumo naudą.

Šiuša, Augustas. Investigation of the Properties of Self-Compacting Concrete Using Dispersed Electronic Waste. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Ernestas Ivanauskas; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: self-compacting concrete, waste glass, durability tests, sustainability.

Kaunas, 2026. 57 p.

Summary

This Master's Final Degree Project examines whether electronic waste glass, used as a partial Portland cement replacement, can be applied in self-compacting concrete without deteriorating its technological, mechanical and durability properties. The aim of the research is to determine the optimal proportion of Portland cement replacement with ground electronic waste glass particles that ensures compliance of self-compacting concrete of class C30/37–XC2–XF3–XA1–SF1, while simultaneously contributing to the reduction of CO₂ emissions and the amount of electronic waste.

The research tasks:

1. to determine the optimal grinding duration of ground waste electrical and electronic equipment glass particles, taking into account particle size and density;
2. to evaluate the effect of different dosages of ground waste glass on the intensity and rate of heat release during hydration;
3. to investigate the effect of ground waste glass particle size on the properties of cement paste and hardened cement paste;
4. to determine the influence of ground waste glass on the technological, physical, and mechanical properties of concrete: density, compressive strength, and frost resistance;
5. to compare the mechanical properties of concrete products made using different glass waste to binder ratios and to determine the optimal ratio by assessing changes in the consistency of concrete mixes and their suitability for use as self-compacting concrete.

The study used glass obtained from discarded televisions, ground in three stages and cleaned from plastic impurities. The apparent density of the glass powder was determined. Three concrete mixtures were designed: a control mix without glass and two mixes in which 10 % and 15 % of the binder mass were replaced by glass, while maintaining the same water-to-cement ratio and identical dosages of chemical admixtures. Fresh concrete properties were investigated by determining density, air content, slump flow and binder hydration. Hardened concrete was evaluated in terms of compressive strength, porosity, predicted frost resistance and a capillary freeze-thaw test.

It was found that the finest ground and plastically cleaned glass is the most suitable for further use. With increasing glass content, the peak of hydration heat decreases and the time to reach this peak increases. All mixes exceeded the strength requirements of class C30/37 after 28 days. The mix with 10 % glass fully met the SF1 slump flow class requirements for self-compacting concrete. It was determined that a 10 % replacement of cement with ground EW glass is an optimal solution for self-compacting concrete production, ensuring the required flowability, higher strength and clear sustainability benefits.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Paveikslų sąrašas	11
Santrumpų ir terminų sąrašas	12
Įvadas.....	13
1. Literatūros analizė.....	15
1.1. Betono gamybos metu išskiriama tarša	15
1.2. Ekonominiai ir aplinkosauginiai rodikliai	15
1.2.1. Pagrindiniai aplinkosauginio poveikio veiksniai.....	15
1.2.2. Gamybos savikaina ir ekonominės naudos vertinimas.....	16
1.3. Stiklo atliekos	16
1.3.1. Stiklo atliekų kilmė ir tipai	17
1.3.2. Stiklo apdorojimas.....	17
1.4. Cemento ir stiklo kompozitas	17
1.4.1. Stiklo atliekos kaip smulkus užpildas.....	18
1.4.2. Stiklo atliekos kaip stambus užpildas.....	19
1.4.3. Stiklo atliekos kaip rišiklis	19
1.5. Savaime susitankinantis betonas	20
1.5.1. SSB tipai pagal savitąjį svorį.....	21
1.5.2. SSB sudėtis.....	21
1.5.3. SSB su stiklo atliekomis.....	22
1.5.4. Šarminė betono korozija.....	22
1.6. Medžiagų atsparumo tyrimai.....	23
1.6.1. Gniuždomasis stipris	23
1.6.2. Susitraukimo matavimas	23
1.6.3. Betono mišinio konsistencija.....	23
1.7. Literatūros analizės išvados.....	24
2. Tyrimo metodologija	25
2.1. Tyrime naudotos medžiagos.....	25
2.1.1. Maltas technologinių atliekų stiklas	25
2.1.2. Portlandcementis	26
2.1.3. Superplastiklis Sika® ViscoCrete® D-190 (33 %).....	27
2.1.4. Orą įtraukianti įmaiša SikaControl® AER-200 P	27
2.1.5. Stabilizatorius Sika® Stabilizer-4 R.....	28
2.1.6. Vanduo	28
2.1.7. Smėlis 0/4 frakcijos	29
2.1.8. Žvirgždo skalda 4/16 frakcijos	29
2.2. Laboratorinių tyrimų metodologija	29
2.2.1. Malto stiklo tariamojo tankio nustatymas	29
2.2.2. Betono mišinio sudėtis ir bandinių formavimas.....	30
2.2.3. Mišinio tankio nustatymas.....	32
2.2.4. Mišinio pasklidimo bandymas	33
2.2.5. Oro kiekio mišinyje nustatymas	34
2.2.6. Hidratacijos eigų tyrimas pusiau adiabatinio kalorimetrijos metodu	34
2.2.7. Gniuždymo stiprio nustatymas	35
2.2.8. Betono uždaro / atviro poringumo tyrimas.....	36

2.2.9. Kapiliarinio užšalimo/atšilimo tyrimas	38
3. Rezultatai ir analizė.....	40
3.1. Malto stiklo tariamasis tankis	40
3.2. Mišinio tankis	41
3.3. Oro kiekis mišinyje.....	42
3.4. Hidratacijos eigos tyrimo pusiau adiabatiniu kalorimetrijos metodu tyrimo rezultatai	43
3.5. Mišinio pasklida	44
3.6. Gniuždomasis stipris	45
3.7. Betono uždaro / atviro poringumo tyrimo rezultatai	47
3.8. Kapiliarinio užšalimo/atšilimo tyrimo rezultatai.....	49
Išvados	52
Literatūros sąrašas	53

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Cemento išskiriama tarša [1]	15
2 lentelė. Naudotų medžiagų kiekiai (kg/m ³) [27]	19
3 lentelė. CEM I 42,5R deklaruojamos eksploatacinės savybės	27
4 lentelė. <i>Sika® ViscoCrete® D-190</i> Produkto duomenys [41]	27
5 lentelė. <i>SikaControl® AER-200 P</i> Produkto duomenys [42].....	28
6 lentelė. <i>Sika® Stabilizer-4 R</i> Produkto duomenys [43]	28
7 lentelė. Kontrolinio mišinio sudėtis	31
8 lentelė. 10% mišinio sudėtis.....	31
9 lentelė. 15% mišinio sudėtis.....	31
10 lentelė. Pasklidimo klasių reikalavimai [48].....	33
11 lentelė. Malto stiklo tankio matavimo duomenys	40
12 lentelė. Šviežio mišinio tankis	41
13 lentelė. Oro kiekis mišinyje	42
14 lentelė. Hidratacijos eigos rezultatai	44
15 lentelė. Pasklidimo rezultatai	45
16 lentelė. Gniuždomojo stiprio rezultatai	46
17 lentelė. Bandinių poringumo rezultatai	47
18 lentelė. Bandinių atsparumo šalčiui kriterijus ir prognozuojamas ciklų skaičius	48
19 lentelė. Masės nuostoliai	49
20 lentelė. Gniuždomojo stiprio nuostoliai	51

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pradinė žaliava	25
2 pav. I stambesnis malimas	26
3 pav. II smulkesnis malimas	26
4 pav. III malimas eliminuojant plastiko priemaišas	26
5 pav. Piknometrai su milteliais ir vandeniu.	30
6 pav. Suformuoti bandiniai	32
7 pav. Pasklidos bandymo kūgis ir padėklas su 500 mm skermens žyme	33
8 pav. Slėgio kamera ir matuoklė.....	34
9 pav. Mėginiai įstatyti į izoliuotą indą.....	35
10 pav. Suskaldyti bandiniai	36
11 pav. Ciklų skaičiaus priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus K_s [52].....	38
12 pav. Bandiniai pamerkti į NaCl tirpalą	39
13 pav. Mišinio tankiai.....	41
14 pav. Oro kiekis mišinyje	42
15 pav. Hidratacijos laiko ir šilumos priklausomybė.....	43
16 pav. Mišinio pasklidos rezultatai	45
17 pav. Bandinių gniuždymo stipris	46
18 pav. Bandiniai mirkinami.....	47
19 pav. Prognozuojamas ciklų skaičius	48
20 pav. Bandinių numeracija.....	50
21 pav. Bandiniai prieš tyrimą	50
22 pav. Bandiniai po tyrimo.....	50

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

Doc. – docentas;

Lekt. – lektorius;

Prof. – profesorius.

Terminai:

ASR – šarminės silikos reakcija.

EA – elektroninės atliekos.

SSB – savaime susitankinantis betonas.

Ivadas

Vienas svarbiausių šiuolaikinės, nuolat kintančios statybos srities aspektų yra vis griežtėjantys aplinkosauginiai reikalavimai ir skatinimas naujuose statybos objektuose kuo plačiau naudoti atliekas bei antrines žaliavas. Viena iš tokių, dar labai mažai nagrinėtų galimybių, yra senų elektroninių prietaisų atliekų perdirbimas. Maksimaliai sumažinus į sąvartynus patenkančių tokių atliekų kiekį, galima pagaminti geresnių savybių ir aplinkai draugiškesnį betoną, kuris būtų atsparus šarminei korozijai, šalčiui, būtų labiau draugiškas aplinkai ir pakankamai ilgaamžis.

Betonas – pagrindinė statybinė medžiaga. Per metus vidutiniškai vienam žmogui pagaminama 3,8 tonos betono [1]. Norint patenkinti tokią betono paklausą, reikalingas didelis kiekis cemento. Cementas yra daugiausiai taršos išskiriantis elementas betone dėl sudėtingo ir daug energijos reikalaujančio klinkerio išdeginimo proceso. Bent iš dalies betono mišinyje pakeitus rišklio (cemento) kiekį kita medžiaga galima ne tik sumažinti cemento poreikį, bet ir iš naujo panaudoti atliekas, turinčias panašias savybes į portlandcementį.

Norint išspręsti išskirtinių formų ar sudėtingo, tankaus armavimo reikalaujančius betono liejimo uždavinius, dažnai susiduriama su problemomis: vietos trūkumas, sudėtingas priėjimas prie klojinių. Savaimė susitankinančio betono pagrindinis naudojimo tikslas yra užpildyti sunkiai pasiekiamas, tankiai armuotas konstrukcijas be papildomo vibravimo. Tokiam betonui paruošti naudojamos kitokios mišinio proporcijos, nei gaminant paprastą betoną. Pagrindinis skirtumas – vandens ir cemento santykis. Jis yra gerokai didesnis, palyginus su kitais betono mišinio tipais. Taip pat dažnai naudojami priedai, pagerinantys mišinio slankumą.

Dėl didelio cemento poreikio savaimė susitankinančio betono gamyboje ženkliai padidėja medžiagos kaina. Taip pat didėjant cemento kiekiui, didėja medžiagos gamybos metu išskirta tarša. Atlikus literatūros analizę buvo nustatyta, kad dalį cemento galima pakeisti silicio turinčiomis medžiagomis [2]. Stiklo atliekų antrinis panaudojimas yra vertingas dėl galimybės sumažinti aplinkos taršą bei pagerinti betono savybes, tačiau jų poveikis betono mechaninėms savybėms nėra visiškai ištirtas.

Kaip dalinė cemento alternatyva pasirinktos stiklo atliekos, kurios papildomai apdirbamos jas sumalant iki reikiamos granuliometrinės sudėties. Bandiniuose naudojamas skirtingas cemento pakeitimo stiklo atliekomis santykis ir tiriamos betono mišinio bei sukietėjusio gaminio savybės.

Tyrimo tikslas – nustatyti optimalų portlandcemenčio pakeitimo maltomis elektronikos atliekų stiklo dalelėmis santykį, kuris užtikrina savaimė susitankinančio betono C30/37–XC2–XF3–XA1–SF1 klasės mechaninių ir slankumo savybių atitikimą norminiams reikalavimams ir kartu prisideda prie CO₂ emisijų bei elektronikos atliekų kiekio mažinimo.

Tyrimo uždaviniai:

1. nustatyti optimalią malto elektroninių atliekų (EA) stiklo dalelių malimo trukmę, atsižvelgiant į dalelių dydį ir tariamąjį tankį;
2. įvertinti skirtingo malto elektroninių atliekų (EA) stiklo kiekio įtaką hidratacijos šilumos išsiskyrimo intensyvumui ir greičiui;
3. ištirti malto elektroninių atliekų (EA) stiklo dalelių dydžio poveikį cemento tešlos ir akmens savybėms;

4. nustatyti malto elektroninių atliekų (EA) stiklo įtaką betono technologinėms, fizikinėms ir mechaninėms savybėms: tankiui, stipriui gniuždant, atsparumui šalčiui;
5. palyginti betono gaminių, pagamintų naudojant skirtingus stiklo atliekų rišiklyje, santykius, mechanines savybes ir nustatyti optimalų atliekų rišiklyje santykį vertinant betono mišinių konsistencijos pokytį ir jų tinkamumą naudoti kaip savaimę susitankinantį betoną SSB.

1. Literatūros analizė

1.1. Betono gamybos metu išskiriama tarša

Pagrindinė pramoninės statybos medžiaga yra betonas. Betonas yra antra pagal kiekį pagaminama ir naudojama medžiaga Žemėje. Vidutinė betono gamyba pasaulyje viršija 3,8 tonos vienam gyventojui per metus [1]. Pagrindinė betono kompozito sudedamoji medžiaga – rišiklis yra cementas. Portlandcementis yra pagrindinis anglies dioksido emisijų šaltinis betone. Dėl šios priežasties dalinis arba visiškas portlandcemenčio pakeitimas, naudojamas betoninių mišinių gamybai, gali reikšmingai prisidėti prie anglies dioksido emisijų sumažinimo šioje pramonės šakoje [2]. Cemento gamyba sudaro 5–6 % viso anglies dioksido, kurį generuoja žmogaus veikla, todėl betono pramonė turi labai didelę veiksmų vertę, kad pasaulis pasiektų anglies dioksido emisijų neutralumą iki 2050 metų [1, 2]. 1 lentelėje pateikiamas bendras išskirto anglies dioksido kiekis pagal cemento tipą.

1 lentelė. Cemento išskiriama tarša [1]

Cemento tipas	Išskirtas bendras anglies dioksido kiekis (kg CO ₂ e/kg)
CEM I (94 % klinkerio)	0,95
CEM II (6–20 % pelenų)	0,89–0,76
CEM II (21–35 % šlako)	0,75–0,62
CEM III (36–65 % šlako)	0,64–0,39
CEM III (66–80 % šlako)	0,38–0,26

1 lentelėje pateikiama, kad CEM III su 36–65 % šlako emisijos vertės svyruoja nuo 0,64 iki 0,39 kg CO₂e/kg. Šių verčių geometrinis vidurkis yra maždaug 0,5 kg CO₂e/kg. Ši vertė yra 47,3 % mažesnė nei CEM I vertė, kuri yra 0,95 kg CO₂e/kg. CEM III/B su 66–80% šlako emisijos vertės svyruoja nuo 0,38 iki 0,26 kg CO₂e/kg, o geometrinis vidurkis yra 0,314 kg CO₂e/kg. Ši vertė yra maždaug 67 % mažesnė nei CEM I vertė [1].

Betono pramonės pažanga anglies dioksido emisijų mažinimo srityje ne tik prisidės prie aplinkos tvarumo, bet ir suteiks galimybes patenkinti ateities betono ir jo žaliavų paklausą. Įvairių inovatyvių sprendimų, nukreiptų į anglies dioksido emisijų mažinimą gaminant betoną, įgyvendinimas lemia atitinkamą betono gamybos kainos mažėjimą [2].

1.2. Ekonominiai ir aplinkosauginiai rodikliai

Statybų sektorius sunaudoja didelį kiekį gamtos išteklių ir energijos. Tai yra vienas iš pagrindinių atliekų susidarymo ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų šaltinių. Betono gamyba ir panaudojimas turi didelę įtaką klimato kaitai ir aplinkos taršai [3, 4].

1.2.1. Pagrindiniai aplinkosauginio poveikio veiksniai

Energijos sąnaudos ir transportavimas, reikalingas cemento gamybai, žaliavų gavybai ir betono paruošimui, daro didžiausią poveikį aplinkos taršai ir anglies pėdsakui, lyginant su pačiomis sudėtinėmis betono medžiagomis [3, 4].

Tyrimai patvirtino, kad paprastojo portlandcemenčio gamyba yra susijusi su didele CO₂ emisija. Perdirbtų užpildų naudojimas užtikrina globalinio atšilimo mažėjimą ir įrodė, kad perdirbtų užpildų panaudojimas gali prisidėti sprendžiant aplinkosaugines problemas [5].

Moksliniai tyrimai rodo tendenciją vertinti tokių atliekų kaip krosnių šlakas, lakieji pelenai ir kiti mineraliniai priedai (mažinant klinkerio ir didinant mineralinių priedų kiekį) panaudojimą betono gamybai, iš dalies pakeičiant portlandcementį, kadangi būtent cementas yra pagrindinis veiksnys, lemiantis betono gyvavimo ciklo sukeltą poveikį aplinkai. Aplinkosauginės žalos (ištekliais, ekosistemų kokybei ir žmonių sveikatai) įvertinimas ir gauti rezultatai parodė, kad pagrindinė aplinkosauginė žala buvo susijusi su poveikiu žmonių sveikatai. Rezultatai taip pat atskleidė, kad didžiausią poveikį ekologijai darė įprasto betono transportavimas lyginant su kitais veiksniais [5, 6].

1.2.2. Gamybos savikaina ir ekonominės naudos vertinimas

Gamybos savikaina yra pagamintos produkcijos kaina, suskaičiuota gamybos procese esančiam produktui per ataskaitinį laikotarpį. Produkto savikaina yra sąnaudos, priskirtos produktui ar paslaugai. Sąnaudos – tai suma, kuri gali būti išmatuota sumokėtų pinigų forma arba kitų perduotų ar paaukotų turto verčių, suteiktų ar paaukotų paslaugų, atsiradusių mokėtinų sumų ar papildomo kapitalo forma, įmonės reikalingoms prekėms ar paslaugoms įsigyti. Gamybos savikaina yra įmonės pagamintai produkcijai priskirtų sąnaudų sumavimas arba įvairių ekonominių išteklių panaudojimas produkto gamybai ar turto įsigijimui. Apskritai, gamybos savikainą galima interpretuoti kaip visas sąnaudas, paaukotas gamybos procese, paverčiant žaliavas į galutinius produktus [7].

Nustatyta, kad betono mišinys, pagamintas su mažiausiomis sąnaudomis, skiriasi nuo mišinių, turinčių mažiausias CO₂ emisijas. Tai reiškia, kad neįmanoma vienu metu pasiekti minimalių gamybos sąnaudų ir CO₂ emisijų [8].

Gauti rezultatai atskleidžia, kad perdirbant stiklo atliekas gaunama 11,9 \$/t ekonominė nauda. Be to, bendras poveikis aplinkai sumažėja 51 % perdirbant stiklo atliekas bei taikant uždaro ciklo perdirbimą. Analizė pabrėžia, kad atskyrimo efektyvumo didinimas smulkinimo ir atskyrimo procese yra efektyviausia strategija ekonominiam faktoriui sustiprinti, o maksimalus atliekų pakartotinis panaudojimas įvairiuose procese turi didžiausią potencialą aplinkosauginei naudai didinti [9].

1.3. Stiklo atliekos

Pastaruoju metu statybos sektoriuje juntamas nuolatinis poreikis panaudoti ir taikyti perdirbamas bei pakartotinai naudojamas medžiagas, siekiant sumažinti reikšmingas CO₂ emisijas ir statybų pabaigoje susidarančių atliekų kiekį. Pastarosios sudaro apie 25–30 % visų Europos Sąjungoje generuojamų atliekų. Ši transformacija papildomai remiama tarptautinėmis gairėmis, tokiomis kaip Europos žaliasis kursas bei ES klimato neutralumo iki 2050 m. tikslas [10].

Stiklas, kurio metinė gamyba 2018–2020 m. Europos Sąjungoje siekė 35,4–36,8 mln. tonų, yra itin perspektyvi medžiaga pereinant prie mažo anglies dioksido kiekio ir išteklius tausojančios ekonomikos. Susmulkinus į duženas, stiklas gali būti grąžinamas atgal į lydymo krosnį ir neribotai perdirbamas uždaro ciklo sistemoje neprarandant savo savybių [10].

Vienas didžiausių atliekų šaltinių yra stiklas, nepaisant jo tinkamumo perdirbimui ir netinkamumo sąvartynams. Nors stiklas gali būti perdirbamas daugybę kartų neprarandant kokybės, didelės stiklo apimtys vis tiek patenka į sąvartynus. Stiklo utilizavimas sąvartynuose sukelia aplinkosauginius ir

finansinius neigiamus efektus. Naudojant stiklą kaip statybinę medžiagą galima sumažinti gamtinių išteklių, tokių kaip žvyras, smėlis ir kt., naudojimą, sumažinti stiklo atliekų sąvartynuose kiekį [11-13].

Nepaisant paplitusios nuomonės, kad stiklas yra 100 % perdirbama medžiaga, šiuo metu tik stiklo pakuočių pramonė, sudaranti apie 62 % (22 mln. tonų) stiklo gamybos 28 Europos Sąjungos šalyse, sėkmingai taiko uždaro ciklo stiklo perdirbimą. Šioje srityje perdirbimo rodiklis šiose valstybėse vidutiniškai siekia 76 % [10].

Stiklo miltelių panaudojimo būdas – cemento pakeitimas betono mišiniuose, t. y. kaip pucolaninės medžiagos. Cemento gamyba yra reikšmingas šiltnamio efektą sukeliančių dujų šaltinis. Norint pagaminti vieną toną cemento, sunaudojama apie 220 kW/h energijos ir išskiriama maždaug 0,64 tonos CO₂. Siekiant sumažinti cemento gamybos poveikį aplinkai, atlikta daug tyrimų, kuriuose smulkintas stiklas tiriamas kaip alternatyvus cemento pakaitalas betono mišiniuose [14].

Tinkamu santykiu pridėjus stiklo atliekų į betono mišinį galima pagerinti betono gniuždomąjį stiprį, lenkiamąjį stiprį ir tempiamąjį stiprį ir konstrukcijos ilgaamžiškumą [12].

1.3.1. Stiklo atliekų kilmė ir tipai

Stiklas gali būti klasifikuojamas į 24 rūšis, tačiau pagrindinės rūšys yra natrio kalkių, lydyto silicio, švino, vitrininio silicio, borosilikato, šarminio silikato, aliuminio silikato, germanio oksido ir bario stiklas. Jis taip pat gali būti plokščias arba formuojamas į butelius, lempos stiklus, priklausomai nuo gamybos ir naudojimo [15].

Mišinys, kuriame buvo 10 % baltųjų ir žaliųjų stiklo miltelių, po 28 parų parodė atitinkamai apie 27 % ir 20 % didesnę gniuždomąjį stiprį, palyginti su kontroliniu skiediniu. Skiedinys su 10 % gintarinio stiklo miltelių pasiekė tik apie 2 % didesnę gniuždomąjį stiprį [16].

1.3.2. Stiklo apdorojimas

Perdirbtas stiklas apdorotas į smulkias daleles, atitinka fizinius, mechaninius ir cheminius reikalavimus, keliamus F ir C klasės pucolaniškoms medžiagoms. Todėl jis gali būti panaudotas betono gamyboje kaip papildoma rišamoji medžiaga. Stiklo dalelių dydis priklauso nuo jų paskirties betone. Paprastai dalelių dydis turi būti mažesnis nei 600 µm. Smulkaus ir stambaus užpildo pakaitalams stiklo dalelių dydžiai parenkami atitinkamai mažesni nei 4,75 mm ir 14 mm. Atliekų stiklo dalelių tankis ir paviršiaus plotas gali būti keičiami taikant tokius apdorojimo metodus kaip plovimas, malimas iki reikalingo dydžio ir gradacija [15].

Bandymo metu stiklas buvo susmulkintas naudojant volą, siekiant gauti smulkią užpildui tinkančią frakciją. Vėliau jis buvo sijotas naudojant standartinių sietų rinkinį. Paskui buvo nustatytos fizikinės savybės [17].

1.4. Cemento ir stiklo kompozitas

Vienas pagrindinių komponentų, atsakingų už dideles cemento anglies dioksido emisijas, yra kalkakmenio kalcinacija, kurios metu anglies dioksidas išsiskiria kaip vienas reakcijos produktų dėl dekarbonizacijos proceso. Tradicinio klinkerio pakeitimas alternatyviais produktais gali gerokai prisidėti prie anglies dioksido emisijų mažinimo, susidarančių šio proceso metu, sumažinimo. Vienas

iš galimų sprendimų – atliekų produktų, turinčių didelį kalcio oksido kiekį, naudojimas klinkerio pakeitimui [2].

Į betono mišinį pridėjus atliekų stiklo užpildą, sumažėja betono tankis, nes atliekų stiklas pasižymi mažesniu tankiu, palyginti su natūraliais užpildais [18].

Dėl cheminės sudėties ir galimos pucolaninės reakcijos, kurią sukuria stiklas, stiklo atliekos turi potencialo būti naudojamas kaip dalinis klinkerio pakaitalas arba cemento priedas, siekiant gaminti portlandcemenčio mišinius [19].

1.4.1. Stiklo atliekos kaip smulkus užpildas

Siekiant atitikti savaime susitankinančio betono (SSB) tinkamumo darbui reikalavimus, būtina įvertinti šias savybes: skleidimosi gebą (užpildymą), pratekėjimo gebą (tekėjimą), klampumą ir atsparumą atsisluoksniavimui. Be šių savybių, naudojant perdirbtus užpildus būtina skirti ypatingą dėmesį smulkiųjų ir stambiųjų užpildų tipui, formai bei dalelių dydžiui, nes šie veiksniai reikšmingai veikia betono mechanines savybes ir ilgaamžiškumą [20].

Vienas iš dažniausių smulkiai trinto stiklo naudojimo būdų yra kaip užpildas betone. Smulkūs silicio milteliai gali būti naudojami cemento mechaninėms savybėms pagerinti. Smulkūs silicio milteliai reaguoja su šarmais cimente ir sukuria daugiau kalcio silikato hidroksido – pagrindinio rišiklio cimente. Stiklą sudaro apie 72 % silicio, o smėlį – 86–96 %, stiklo atliekos yra potencialiai perspektyvus dalinis smėlio pakaitalas betone [11, 12, 21].

Stiklo atliekos buvo smulkinamos naudojant smulkintuvą. Tik smulkintas atliekų stiklas, kuris praėjo per 5 mm sietą, buvo naudojamas kaip smulkus užpildas. Sutrinto stiklo tankis buvo $3,0 \text{ g/cm}^3$ [22].

Betono mišiniuose, kuriuose 20% smėlio buvo pakeista stiklo atliekomis, tempiamasis stipris padidėjo 18,38 %. Tai buvo paaiškinta sumažėjusiu pralaidumu ir geru dalelių sukibimu tarp stiklo užpildo ir cemento. Lenkiamasis stipris padidėjo iki 8,92 % su iki 20 % smėlio pakeitimu smulkiu stiklu. Gniuždymo stipris padidėjo iki 5,28 % su 20 % smėlio pakeitimu per 28 dienų kietėjimo laikotarpį. Šie pakitimai priskirti pucolaninei reakcijai tarp kalcio hidroksido ir silicio [21].

Mažesnio apdorojamumo priežastis yra mechaninis stiklo užpildo susikibimas dėl jo kampuotos formos, kuri gali lemti plastifikatorių ar stabilizatorių poreikį siekiant užtikrinti tinkamą mišinio konsistenciją statybos darbų metu. Remiantis kelių tyrimų apžvalga, nustatyta, kad optimali atliekų stiklo dalis, užtikrinanti didžiausią apdorojamumą, siekia maždaug 20 % [23].

Vandens ir rišiklio santykis buvo 35 %, 45 % ir 55 %, o stiklo atliekomis buvo pakeista 0 %, 50 % ir 100% smulkaus užpildo. Gniuždomasis betono stipris sumažėjo didinant V/C santykį ir didinant stiklo kiekį smulkiame užpilde. Stiprio sumažėjimas galėjo būti dėl sumažėjusio sukibimo tarp stiklo paviršiaus ir cemento hidratų [22].

Atliekant sustingusio betono lenkimo stiprio bandymus, geriausi rezultatai (5,49 MPa) buvo gauti mišinyje, kuriame 10 % smėlio buvo pakeista perdirbtu stiklu. Antras pagal stiprumą rezultatas (4,86 MPa) buvo nustatytas kontroliniuose mėginiuose, kuriuose stiklo atliekos nebuvo naudojamos. Mėginiai, kuriuose 30 % smėlio pakeista stiklu, parodė dar mažesnę lenkimo stiprį (4,11 MPa), palyginti su betonu be smėlio pakeitimo [24].

Tyrimai parodė, kad optimalus užpildų pakeitimo atliekų stiklu santykis yra apie 20 %. Be to, stiklo spalva neturi reikšmės betono stiprumui [18].

Betono mišiniai su stiklo atliekomis kaip užpildu turi teigiamą ilgaamžiškumo ir atsparumo pokytį, todėl gali būti panaudoti įvairioms apsauginėms konstrukcijoms. Gniuždomojo stiprio sumažėjimą galima kompensuoti koreguojant vandens ir užpildo santykį ir oro kiekį mišinyje [22].

1.4.2. Stiklo atliekos kaip stambus užpildas

Atliekų stiklas turi potencialo būti naudojamas kaip stambus užpildas betone, kas gali suteikti estetinių privalumų. Tačiau tai gali turėti neigiamą poveikį mechaninėms savybėms. Pakeitus natūralų stambųjį užpildą stambiomis stiklo atliekomis, žymiai sumažėjo gniuždomasis ir tempimo stipris, gniuždomasis stipris sumažėjo iki 38 % [19].

1.4.3. Stiklo atliekos kaip rišiklis

Betono mišinys su smulkiai sumaltomis stiklo atliekomis, naudojamomis kaip cemento pakaitalas, pasižymi geresnėmis slankumo savybėmis. Atlikus struktūrinę mikroskopinę analizę, nustatyta, kad sąryšis tarp rišiklio (su 20 % pakeitimu stiklo atliekomis) ir užpildo yra geras. Taip pat buvo pastebėtos tuštumos ir ploni įtrūkimai, kurie galėjo sukelti stiprumo sumažėjimą pakeičiant didesnę rišiklio procentą stiklo atliekomis, palyginus su tradiciniu betono mišiniu. Palyginus su cemento dalelėmis, smulkios stiklo dalelės nėra tokios reaktyvios [13, 21, 25]. Sumaltos stiklo atliekos su dalelių dydžio pasiskirstymu nuo 0,0015 iki 0,070 mm naudojamos kaip cemento pakaitalas ir kaip cemento priedas [26].

Tyrime buvo žengtas žingsnis tvaraus savaime susitankinančio betono link, iš dalies keičiant cementą įvairiais atliekų stiklo kiekiais – nuo 0 % iki 20 %, kas 5,0 % padidinant stiklo atliekų dalį (žr. 2 lentelę). Be to, siekiant pagerinti šviežio betono tėkmės savybes, kaip užpildas buvo naudojama 10 % marmuro atliekų (pagal smėlio masę) [27].

2 lentelė. Naudotų medžiagų kiekiai (kg/m³) [27]

Medžiaga	S-0 %	S-5 %	S-10 %	S-15 %	S-20 %
Cementas	420	399	378	357	336
Smulkus užpildas	567	567	567	567	567
Stambus užpildas	1260	1260	1260	1260	1260
V/C santykis	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Plastiklis	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Marmuro atliekos	63	63	63	63	63
Atliekų stiklas	–	21	42	63	84

Kitame tyrime nurodoma, kad geriausi rezultatai gauti pakeičiant 20 % rišiklio stiklo atliekomis. Betono slankumas padidėjo, didėjant pakeisto rišiklio stiklo atliekomis kiekiui. Gniuždomasis stipris po 7 dienų kietėjimo sumažėjo naudojant stiklo atliekas, tai galėjo nutikti dėl pucolaninio reiškio

stiklo atliekose. Naudojant 30 % stiklo atliekų kaip rišiklio pakaitalą betono gniuždomasis stipris, lenkiamasis stipris ir atplėšimo stipris sumažėjo dėl išsisluoksniavimo [13]. Atlikus kitų šaltinių analizę nustatyta, kad rasti optimaliausi rišiklio pakeitimo stiklo atliekomis procentai skiriasi ir optimalus rišiklio pakeitimo santykis svyruoja nuo 10 iki 30 procentų [25, 26]. Naudojant stiklo atliekų miltelius, kurių kiekis viršija 15 %, kaip cemento pakaitalą, sumažėja 28 dienų betono gniuždomasis stipris. Norint kompensuoti betono gniuždomojo stiprio sumažėjimą, reikia sumažinti vandens ir cemento santykį. 45 MPa betono mišinyje pakanka sumažinti vandens ir cemento santykį apie 0,03, kad būtų panaikintas neigiamas 15 % stiklo miltelių kaip cemento pakaitalo poveikis [26].

Gniuždymo bandymų rezultatai parodė, kad stiklo atliekų naudojimas cemento pakeitimui neigiamai veikia betono gniuždomąjį stiprį. Palyginus su kontroliniu mėginiu, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % ir 50 % stiklo atliekų pakeitimas sumažino gniuždomąjį stiprį atitinkamai 3 %, 6 %, 37 %, 13 % ir 23 % [28].

Kitame straipsnyje nurodoma, kad SSB mechaninės charakteristikos – gniuždymo, tempiamasis, smūginis bei ištraukimo stipris – pagerėjo iki 10 % atliekų stiklo pakeitimo lygio. Šis pagerėjimas siejamas su atliekų stiklo dalelių puzolaninėmis savybėmis ir mikro užpildymo efektu, kuris sustiprino vidinę SSB struktūrą. Tačiau didinant atliekinio stiklo kiekį iki 15 % ir 20 %, pastebėtas stiprumo sumažėjimas, kurį lėmė betono išsisluoksniavimas, glotni atliekinio stiklo dalelių paviršiaus struktūra bei susiformavusi silpnesnė mikrostruktūra. Tyrimo išvadose nustatyta, kad 10–15 % atliekų stiklo galima naudoti kaip cemento pakaitalą savaime susitankinančiame betone, siekiant pagerinti betono takumo savybes bei mechaninius rodiklius [27].

Stiklo atliekų miltelių kiekio padidėjimas, pakeičiant cementą, didina betono slankumą. 33 MPa stiprumo betono mišinyje, kiekvienas 5 % stiklo miltelių padidėjimas padidina mišinio slankumą apie 10 mm. Kitame šaltinyje rasta, kad slankumas mažėja padidinus stiklo atliekų kiekį cimente, taip atsiranda mišinio apdorojimo sunkumų [26, 28].

Smulkinto stiklo kaip papildomos rišamosios medžiagos įmaišymas paprastai sumažina betono apdorojamumą (plastiškumą) arba neturi reikšmingo poveikio [23].

1.5. Savaime susitankinantis betonas

Svarbiausi skirtumai tarp savaime susitankinančio betono, naudojant tiek natūralius, tiek perdirbtus užpildus, ir įprasto betono yra mišinio elgsena šviežioje stadijoje. Skirtingai nei įprastas betonas, savaime susitankinantis betonas gali užpildyti formas (net ir tankiai armuotose konstrukcijose) be papildomo tankinimo, vien tik savo svorio dėka. Dėl didelio takumo, savaime susitankinantis betonas yra tinkamas naudoti sudėtingomis sąlygomis ir vietose su tankia armatūra. Savaime susitankinančio betono technologijos naudojimo vystymas yra palankus statybos pramonėje, siekiant išspręsti problemas, susijusias su betono liejimu objekte įrenginėjant monolitines konstrukcijas [20, 29].

Perdirbtų užpildų naudojimas savaime susitankinančio betono gamyboje yra pagrįstas ir techniškai įmanomas, tačiau būtina imtis tam tikrų atsargumo priemonių, kad šio tipo betono savybės būtų išsaugotos ir pritaikytos prie reikalaujamų parametrų kiekvienu konkrečiu atveju. Savaime susitankinančio betono stiprumo savybės, tokios kaip gniuždymo ir tempimo stipris, pagerėja naudojant iki 10 % stiklo miltelių kaip cemento pakaitalo [20, 30].

1.5.1. SSB tipai pagal savitąjį svorį

Lengvasis savaime sutankėjantis betonas. Lengvasis savaime susitankinantis betonas yra naujos kartos kompozitinė medžiaga, sujungianti dvi pagrindines pažangias betono savybes: savaiminį tankinimąsi ir mažą savitąjį svorį. Lengvieji agregatai yra viena svarbiausių sudėtinių dalių lengvojo savaime sutankėjančio betono mišiniuose. Dažniausiai mišiniuose naudojami ne didesni kaip 12,5–16 mm dydžio užpildai. Tankis yra 880–1990 kg/m³. Lengvųjų užpildų stiprumas daro tiesioginę įtaką kietėjančio betono mechaninėms savybėms. Nors daugelis tyrimų nepateikia rišiklio gniuždymo stiprio, aišku, kad jis žymiai mažesnis nei įprastų rišiklių. Pavyzdžiui, skirtingų lengvasvorių užpildų tipų stipris gali siekti iki 11,8 MPa. Dauguma atvejų pagrindą sudarė lengvi užpildai, tokie kaip keramzitas. Cemento ir užpildų kiekis mišiniuose svyravo plačiai: nuo 9,44 % iki 42,53 % visos mišinio masės [31, 32].

Sunkaus svorio savaime susitankinantis betonas. Pakeitus įprastus agregatus tankesniais agregatais, tokiais kaip baritas, hematitas, magnetitas, geležies šratukai ir pan., cementiniame mišinyje bus pagamintas sunkusis betonas. Paprastai sunkiojo betono agregatams būdingas tankis yra 3000 kg/m³. Betonas kurio tankis 2600 kg/m³ priskiriamas sunkiojo betono kategorijai [33].

1.5.2. SSB sudėtis

Savaime susitankinančio betono mišinio proporcijos skiriasi nuo įprasto betono, nes savaime susitankinantis betonas turi daugiau rišiklio ir smulkaus užpildo, bet mažiau stambių užpildų. Taip pat, SSB mišinyje dažnai naudojami superplastikliai, kad pagerinti slankumą neprarandant stiprio [29].

Vandens ir rišiklio santykis pagal tūrį paprastai nustatomas nuo 0,9 iki 1,0, priklausomai nuo rišiklio savybių. Superplastifikatoriaus dozavimas ir galutinis vandens ir rišiklio santykis nustatomas taip, kad būtų užtikrintas savaime susitankinamam betonui reikalingos savybės ir tinkamas takumas [29].

Norint išlaikyti tinkamą SSB mišinio slankumą, siūlomos dvi sprendimo galimybės. Pirmasis – padidinti cemento kiekį mišinyje, kas sukelia papildomas ekonomines išlaidas ir gali sukelti įtrūkimų riziką dėl egzoterminės reakcijos. Antrasis – išlaikyti įprastą cemento dozavimą ir naudoti mineralinį priedą, tokį kaip susmulkintos stiklo atliekos [34].

SSB betono gamyba: smulkūs ir stambūs užpildai buvo supilti į maišymo būgną ir sausai sumaišyti, kad užtikrintų vienodą pasiskirstymą. Tada buvo pridėtas reikiamas kiekis stiklo miltelių (nuo 0 iki 20 %) kaip cemento pakaitalo. Vandens buvo pridėta palaipsniui laikui bėgant, kad užtikrintų vienodą susimaišymą. Plastifikatorius buvo sumaišytas su vandeniu ir pridėtas palaipsniui, kad pagerintų tekėjimo savybes [30].

Tyrime naudotos medžiagos buvo I tipo portlandcementis, vandentiekio vanduo, žvyras, smėlis, akmens miltai ir polikarbonatų pagrindu pagamintas superplastiklis. Stambiagrūdė užpildų frakcija buvo žvyras, kurio didžiausias grūdėtumas siekė 19 mm, o tankis – 2,84 t/m³. Upės smėlio tankis buvo 2,75 t/m³, o smėlio ekvivalentas – 75. Akmens miltai naudoti siekiant modifikuoti smėlio savybes. Superplastiklis naudotas tam, kad būtų pasiektos reikiamos savaime susitankinančio betono savybės šviežioje būsenoje. Superplastiklio savitasis svoris buvo 1,12 g/cm³. Jo kiekis svyravo nuo 0,3 % iki 0,9 % cemento masės [35].

1.5.3. SSB su stiklo atliekomis

Stiklas yra amorfinė medžiaga ir net po susmulkinimo, stiklo gabalėliai išlieka lygaus paviršiaus. Lygaus stiklo miltelių paviršius pagerina tekėjimo savybes ir suteikia mažesnę pasipriešinimą savaime susitankinančio betono ingredientų tekėjimui, palyginti su šiurkščiu paviršiumi. Tačiau šiurkštus paviršius užtikrina geresnį stiprumą, lyginant su lygiu paviršiumi [30].

Stiklo atliekų milteliai turėtų būti naudojami kaip cemento pakaitalas ne daugiau kaip 30 % masės. Tačiau stiklo naudojimas kaip pakaitalas cementui, sumažino gniuždomąjį stiprį po 7 dienų, tačiau vėliau buvo pastebėtas reikšmingas pagerėjimas. Gniuždomojo stiprio pagerėjimas vėliau nei po 7 dienų yra dėl pucolaninio stiklo miltelių poveikio, nes pucolaninė reakcija vyksta lėčiau nei cemento hidratacija [30, 34].

1.5.4. Šarminė betono korozija

Perdirbtas atliekų stiklas atitinka pagrindinius cheminius reikalavimus, keliamus pucolaninėms medžiagoms, bet dėl didelio natrio oksido (Na_2O) kiekio jis neatitinka šarminių medžiagų kiekio reikalavimų, o tai gali sukelti nepageidaujamas šarminių medžiagų ir silicio reakcijas. Dėl šios priežasties atliekų stiklas daugiausia tiriamas kaip papildoma rišamoji medžiaga betonui stabilizuoti. Nors stiklo žaliava padidina šarmų koncentraciją porų tirpale, smulkūs stiklo grūdai efektyviai slopina šarminės korozijos sukeltas plėtimosi deformacijas. Šis slopinantis poveikis atsiranda dėl padidėjusios aliuminio koncentracijos porų tirpale, kuri sumažina reaguojančios silikos tirpimą, taip kontroliuodama šarminės silikos reakciją [23, 36].

ASR proceso metu įvairios nestabilios silikato fazės, esančios reaguojančiuose užpilduose, yra ištirpinamos šarminio porų tirpalo, esančio betone, ir sudaro ASR gelį. Dėl savo poringos struktūros ir daugybės hidrofilų grupių, gelis sukuria slėgį, įsiurbia vandenį ir plečiasi. Dėl to gali prasidėti ir išsivystyti įtrūkimai aplink reaguojančius agregatus, kas lemia betono pablogėjimą [37].

Šarminės korozijos intensyvumas cementiniuose mišiniuose, kuriuose panaudoti stiklo milteliai, priklauso nuo kelių veiksnių, įskaitant stiklo smulkumą, kiekį, spalvą ir tipą. Skiedinys, pagamintas iš stiklo miltelių, kurių dalelių dydis siekė 38 μm , pasižymėjo mažesniu išsiplėtimu, palyginti su skiediniu, kuriame buvo stiklo miltelių, kurių dalelių dydžiai buvo 75 μm ir 150 μm [16].

Norint plačiai naudoti perdirbtą stiklą betone, didžiausias iššūkis, kurį reikia spręsti, yra šarminės silikos reakcijos (ASR), kurias sukelia stiklas. ASR reiškia kenksmingą išsiplėtimo reakciją, kuri laikui bėgant vyksta cementiniuose mišiniuose tarp stipriai šarminės cemento pastos ir reaguojančios silikos agregatuose. Ši reakcija sukelia ASR gelio susidarymą, kuris sugeba sugerti drėgmę ir sukelti išsiplėtimą, vėliau sukeldamas vidinius tempimo įtempimus ir lemiančius betono degradaciją [38].

Smulkinto stiklo elgseną kaip papildomą rišamąją medžiagą betone iš esmės lemia jo smulkumas ir pakeitimo cementu santykis. Keliose tyrimuose nustatyta, kad stiklo pucolaniškas aktyvumas išryškėja esant mažesniai dalelių dydžiui, tikėtina, dėl didesnio reaktyvumo ir paviršiaus ploto. Todėl siūloma tirti stiklo savybes, kai dalelių dydis yra mažesnis nei 45 μm , nes mažesnės dalelės taip pat gali sumažinti šarminės-silicio reakcijos riziką. Keturi pagrindiniai veiksniai, kurie yra siejami su šarminės silikos reakcija (ASR) yra: reaguojanti silika, šarminiai metalai, drėgmė ir pakankamas pH lygis. ASR neįvyks, jei bent vienas iš šių svarbių veiksnių bus neprieinamas. Buvo naudojami laboratorijoje paruošti mišrūs stiklo milteliai. Gėrimų buteliai, pagaminti iš rudo, žalio ir

skaidraus stiklo, buvo surinkti, ultragarsiniu būdu išvalyti, nuplauti, išdžiovinti, susmulkinti ir sumalti (naudojant diskinius malūnus). Sumalti stiklo milteliai buvo perplauti, o po to smulkūs stiklo milteliai ($<50\ \mu\text{m}$) buvo atskirti [23, 36, 38].

Betone, kuriame yra 40 % perdirbto stiklo, ir buvo atliktas 12 valandų karbonizacijos kietinimo procesas, 28 dienų gniuždomasis stipris padidėjo 18 %, o ASR išsiplėtimas buvo sumažintas 86 % iki vertės, esančios žemiau saugaus ribos. Karbonizacijos kietinimas reikšmingai sumažino $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kiekį ir padidino CaCO_3 kiekį, kas lėmė pH sumažėjimą nuo 13,4 iki 12,5. Sumažėjus pH, mažiau reaguojančios silikos tirpsta iš agregatų, todėl ASR reakcija silpnėja [38].

1.6. Medžiagų atsparumo tyrimai

1.6.1. Gniuždomasis stipris

Betono gniuždomasis stipris yra svarbus parametras, naudojamas analizuojant ir projektuojant betonines konstrukcijas. Daugumoje nacionalinių ir tarptautinių projektavimo normų betonas klasifikuojamas pagal gniuždomąjį stiprį [39].

Standartiniai betoniniai kubeliai ($150 \times 150 \times 150\ \text{mm}$) buvo suformuoti iš skirtingų betono mišinių. Gniuždomojo stiprio bandymai buvo atlikti po 7, 28 ir 90 dienų kietėjimo, bandiniams kietėjant vandenyje, o bandiniams kietėjant šildomoje kameroje, kurios temperatūra buvo $50\ ^\circ\text{C}$, po 7 dienų [25].

1.6.2. Susitraukimo matavimas

Nustatyta, kad su stiklo atliekų kiekio didinimu padidėjo ir džiūvimo susitraukimas abiejose betono mišinių klasėse. Nors vandens kiekis tarp skirtingų klasių betonų buvo laikomas pastovus, V/C santykis didėja įtraukiant daugiau atliekų. Tai reiškia, kad daugiau vandens yra panaudoja cemento hidratacijos reakcijai. Perteklinis vandens kiekis mišiniuose nėra naudojamas stiklo atliekų hidratacijos procese, nes jis vėliau reaguoja su cemento hidratacijos produktais, kalcio hidroksidu, sudarydamas papildomą CSH. Džiūvimo-susitraukimo padidėjimas buvo 9,24 %, 19,29 %, 29,95 % ir 36,06 % „M30 klasės“ mėginiuose ir 5,12 %, 18,96 %, 29,42 % ir 35,78 % „M40 klasės“ mėginiuose, pakeičiant nuo 10 % iki 40 % rišiklio stiklo atliekomis [25].

1.6.3. Betono mišinio konsistencija

Pasklidimui įvertinti buvo taikomi sklido (ang. slump flow) ir V-piltuvėlio (ang. V-funnel) bandymai. Pasklidimo bandymas (angl. slump flow) yra dažniausiai taikomas savaime susitankinančio betono bandymas, leidžiantis tiksliai įvertinti jo užpildymo gebą. Slankumo bandymo vertinimui taikomos techninės SSB specifikacijos, numatytos Europos standartuose (Eurokodas). Pagal šias specifikacijas, priimtinas skleidimosi vertės intervalas yra nuo 600 iki 850 mm [27, 40].

T50 pasklidimo bandymas atliekamas pagal tą pačią metodiką kaip ir kiti skleidimosi (ang. slump flow) bandymai ir vykdomas remiantis savaime susitankinančio betono techninėmis specifikacijomis, numatytomis Europos standartuose. Laikmatis paleidžiamas iškart pakėlus kūgį, o užfiksuojamas laikas, per kurį betonas pasiekia 500 mm skersmens sklaidą (šis laikas vadinamas T50). Pagal technines specifikacijas, T50 laikas turi būti ne trumpesnis nei 2 sekundės ir ne ilgesnis nei 5 sekundės [27].

1.7. Literatūros analizės išvados

Analizuojant mokslinius šaltinius, nustatyta, kad cemento gamyba yra vienas iš reikšmingiausių CO₂ emisijų šaltinių statybų sektoriuje, o portlandcemenčio pakeitimas alternatyviomis medžiagomis – veiksmingas sprendimas emisijų mažinimui. Viena iš cemento mažinimo statybos sektoriuje galimybių yra atliekų stiklo panaudojimas betono mišiniuose kaip rišiklio, smulkaus ar stambaus užpildo pakaitalas. Tyrimai rodo, kad optimalus stiklo, kaip cemento pakaitalo, panaudojimo kiekis yra iki 20 %, nes didesnė dalis gali sukelti betono išsisluoksniavimą, sumažinti gniuždomąjį stiprį ar pabloginti takumo savybes bei apdorojamumą. Panaudojus iki 15–20 % stiklo atliekų, kaip cemento pakaitalo, galima pagerinti betono takumą, stiprumą bei sumažinti neigiamą betono poveikį aplinkai.

Stiklo atliekos pasižymi ne tik pucolaninėmis, bet ir mechaninėmis savybėmis, kurios leidžia iš dalies pakeisti cementą ir sumažinti gamtinių išteklių naudojimą bei taršą. Tačiau norint užtikrinti ilgalaikį betono patvarumą ir eksploatacines savybes, būtina įvertinti ir galimus iššūkius, susijusius su šios medžiagos naudojimu. Būtina atsižvelgti į šarminės betono korozijos riziką, kuri gali sukelti mikro įtrūkimus, todėl ypač svarbus stiklo dalelių dydis ir cheminė sudėtis.

Apibendrinant galima teigti, kad perdirbtas stiklas yra perspektyvi, tvari alternatyva tradicinėms betono sudedamosioms dalims, jei jo panaudojimas yra tinkamai optimizuotas.

2. Tyrimo metodologija

Tyrimo tikslas – nustatyti optimalų portlandcemenčio pakeitimo maltomis elektronikos atliekų stiklo dalelėmis santykį, kuris užtikrina savaime susitankinančio betono C30/37–XC2–XF3–XA1–SF1 klasės mechaninių ir slankumo savybių atitikimą norminiams reikalavimams bei kartu prisideda prie CO₂ emisijų bei elektronikos atliekų kiekio mažinimo.

2.1. Tyrime naudotos medžiagos

Tyrimo metu mišinio sudėtis turėtų tenkinti betono C30/37–XC2–XF3–XA1–SF1 klasę. Paruošiami trys skirtingos sudėties mišiniai, įskaitant kontrolinį – be stiklo. Atliekami trys betono mišinio maišymai po 15 l. Visos medžiagos dozuojamos pagal svorį, laikantis standartinių mišinių ruošimo rekomendacijų.

2.1.1. Maltas technologinių atliekų stiklas

Tyrimo metu kaip dalinis cemento pakaitalas buvo naudotas maltas stiklas, gautas perdirbant senų kineskopinių televizorių atliekas. Šis pasirinkimas atspindi šiuolaikines tvarios statybos ir žiedinės ekonomikos tendencijas, siekiant pakartotinai panaudoti sudėtingai perdirbamas elektronikos atliekas. Tyrimuose buvo naudojamos trijų rūšių stiklo duženų atliekos:

- stambesnio malimo stiklo duženos su plastiko priemaišomis (įvardijama I maišymas stambesnis);
- smulkesnio malimo stiklo duženos su plastiko priemaišomis (įvardijama II maišymas smulkesnis);
- smulkesnio malimo stiklo duženos su maksimaliai eliminuotomis plastiko priemaišomis (įvardijama III maišymas smulkesnis).



1 pav. Pradinė žaliava

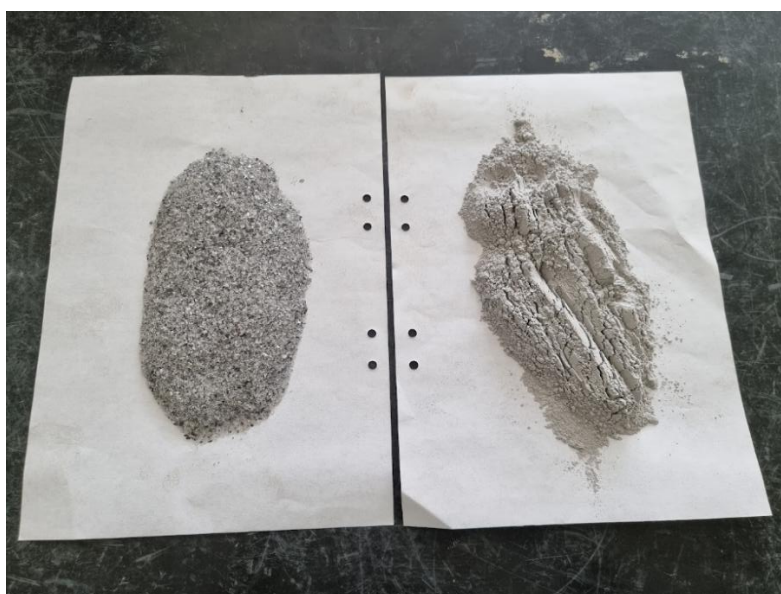
Perdirbimo metu stiklo atliekos buvo susmulkintos iki miltelių, o tai yra kritiškai svarbu kontroliuojant šarminę silicio dioksido reakciją (ASR). Naudojant smulkų, amorfinį stiklą, jis gali veikti kaip aktyvus mineralinis priedas, dalyvaujantis cemento hidratacijos procesuose. Nustatyta, kad tokio smulkumo malto stiklo priedas gali pagerinti betono takumo savybes ir, esant tam tikrai koncentracijai, padidinti betono gniuždymo stiprį.



2 pav. I stambesnis malimas



3 pav. II smulkesnis malimas



4 pav. III malimas eliminuojant plastiko priemaišas

Pagrindinis iššūkis, susijęs su kineskopų stiklo naudojimu, yra potenciali šarminė silicio dioksido reakcija. Ši reakcija gali sukelti betono plėtimąsi ir įtrūkimus. Ši rizika valdoma tiksliai kontroliuojant malimo smulkumą ir kontroliuojant keitimo santykį – tyrimo metu stiklo milteliai buvo naudoti kaip dalinis cemento pakaitalas tam tikru, bandomuoju procentu, siekiant optimizuoti teigiamą pucolaninį efektą ir minimalizuoti šarminės korozijos riziką.

2.1.2. Portlandcementis

Tyrimo kaip hidraulinė rišamoji medžiaga naudotas portlandcementis CEM I 42,5 R (žr. 3 lentelę). Šis cementas naudotas visiems tyrimo naudotiems mišiniams. Pagal cemento pavadinimą, cementas yra priskirtas didelio ankstyvojo stiprumo klasei ir turi standartinį stiprų didesnę nei 42,5 MPa. Gaminys atitinka LST EN 197-1:2011 darnųjų standartą.

Pagal gamintojo rekomendacijas šis cementas geriausiai tinka apdailos darbams, perdangoms, laiptams, grindims, mūro ir tinko skiediniams. Su šiuo cementu užmaišyti skiediniai ir betonai

nesisluoksniuoją, pasižymi dideliu plastiškumu, iš jų neatsiskiria vanduo. Mišiniai ilgą laiką išlieka technologiški – juos galima naudoti ilgesnį laiką.

3 lentelė. CEM I 42,5R deklaruojamos eksploatacinės savybės

Esminės charakteristikos	Eksploatacinės savybės
Įprastiniai cementai	CEM I 42,5R
Gniuždymo Stipris, MPa: ankstyvasis stipris standartinis stipris	$\geq 20,0$ $\geq 42,5 \leq 62,5$
Rišimosi pradžia, min	≥ 60
Tūrio pastovumas, mm	≤ 10
Kaitmenys, %	$\leq 5,0$
Netirpmenys, %	$\leq 5,0$
Sulfatų (SO ₃) kiekis, %	$\leq 4,0$
Chloridų kiekis, %	$\leq 0,10$
Šarmų kiekis, sk Na ₂ O ekv., %	$\leq 0,8$

2.1.3. Superplastiklis Sika® ViscoCrete® D-190 (33 %)

Sika® ViscoCrete® D-190 (33 %) yra didelio efektyvumo superplastiklis, naudojamas betonui ir cementiniam skiediniui (žr. 4 lentelę). Pagal EN 934:2 standartą, produktas atitinka didelės vandens redukcijos superplastiklį.

Pagrindinis superplastiklio privalumas yra gebėjimas itin veiksmingai sumažinti vandens kiekį mišinyje, leidžiant pasiekti didesnę betono tankį, mažesnę vandens pralaidumą ir didesnę stiprį bei ilgaamžiškumą. Tuo pat metu jis veikia kaip galingas plastifikatorius, ženkliai padidindamas betono mišinio tekamumą ir apdirbamumą net ir prie labai mažo vandens/cemento santykio. Šis tekamumo padidėjimas leidžia gaminti savaime sutankėjančius betono mišinius be papildomos vibracijos.

4 lentelė. *Sika® ViscoCrete® D-190* Produkto duomenys [41]

Esminės charakteristikos	Eksploatacinės savybės
Pagrindinis cheminis komponentas	Modifikuotų polimerų vandeninis tirpalas
Tankis	$1,08 \pm 0,02$ kg/l (esant +20°C)
pH-Vertė	$4,5 \pm 1$
Klampumas	Mažo klampumo skystis
Suminis Chlorido Jonų kiekis	$\leq 0,2$ % nuo masės
Ekvivalentinio Natrio Oksido kiekis	$\leq 0,4$ % nuo masės

2.1.4. Orą įtraukianti įmaiša SikaControl® AER-200 P

SikaControl® AER-200 P (žr. 5 lentelę) yra betono įmaiša, kuri, pasitelkus specialią technologiją, įtraukia orą ir betono ar skiedinio mišiniuose suformuoja didelį kiekį rezervinių, reikiamo dydžio mikroporų, didinančių sukiestėjusio betono ar skiedinio atsparumą šalčiui. Jis veikia cheminiu būdu, sudarydamas betono mišinyje kontroliuojamą rezervinių mikroporų tinklą, kuris efektyviai sugeria

vandens tūrio pokyčius, sukeliamus ledo plėtimosi, ir taip apsaugo betono struktūrą nuo irimo. Produktas atitinka EN 934 – 2.

Pagrindinis šios įmaišos privalumas yra ženklus betono ilgaamžiškumo pagerinimas, esant nuolatiniams šalčio ciklams. Dėl unikalios cheminės reakcijos sukuriamas padidintas oro tuštumų stabilumas. Tai reiškia, kad įmaišos efektyvumas yra mažiau jautrus mišinio maišymo laikui, intensyvumui ar nedideliems užpildų savybių pokyčiams.

5 lentelė. *SikaControl® AER-200 P* Produkto duomenys [42]

Esminės charakteristikos	Ekspluatacinės savybės
Pagrindinis cheminis komponentas	Kalcio karbonato ir lydinio miltelių mišinys
Tankis	~2700 kg/m ³
Suminis Chlorido Jonų kiekis	< 0,1%
Ekvivalentinio Natrio Oksido kiekis	< 1%

2.1.5. Stabilizatorius Sika® Stabilizer-4 R

Sika® Stabilizer-4 R (žr. 6 lentelę) yra skystos konsistencijos klampą modifikuojanti betono įmaiša, pagaminta modifikuotų angliavandenių pagrindu. Pagrindinė jo paskirtis yra padidinti betono mišinio stabilumą ir koheziją (vientisumą), ypač toms betono rūšims ir situacijoms, kai kyla segregacijos (atsiskyrimo) arba vandens susidarymo ant paviršiaus rizika. Stabilizatorius naudingas tuomet, kai betono mišinio savybės keičiasi dėl užpildų svyravimų, mažo smulkių dalelių kiekio arba naudojant mažacementinius mišinius.

Šis priedas yra specialiai sukurtas savaime sutankėjantiems betonams, kuriems reikalinga puiki tekamumo ir stabilumo pusiausvyra. Dėl padidėjusios kohezijos, sumažėja betono segregacija ir vandens atsiskyrimas, todėl gaunami lygesni betono paviršiai bei sumažinami tankinimo defektai.

6 lentelė. *Sika® Stabilizer-4 R* Produkto duomenys [43]

Esminės charakteristikos	Ekspluatacinės savybės
Pagrindinis cheminis komponentas	Modifikuoti angliavandeniai
Tankis	~1,03 kg/l
pH-Vertė	~7,5
Suminis Chlorido Jonų kiekis	< 0,1 %
Ekvivalentinio Natrio Oksido kiekis	< 0,2 %

2.1.6. Vanduo

Tyrime visų betono mišinių gamybai naudotas geriamasis vandentiekio vanduo. Vanduo buvo imamas tiesiai iš viešojo vandentiekio, užtikrinant jo tinkamumą pagal standarto nuostatas. Jokie papildomi vandens tyrimai nebuvo atlikti.

Vanduo švarus, be matomų priemaišų, naftos produktų ar rūgščių, galinčių neigiamai paveikti cemento hidratacijos procesą ir galutines betono savybes. Vandens temperatūra mišinio gamybos metu buvo kontroliuojama, kad atitiktų reikalaujamas bandymo sąlygas.

2.1.7. Smėlis 0/4 frakcijos

Smulkusis užpildas betono mišinyje buvo natūralus 0/4 frakcijos smėlis. Šis smėlis atitinka LST EN 12620:2002 „*Betono užpildai*“ [44] standarto reikalavimus ir buvo naudojamas kaip standartinis, gerai žinomų savybių užpildas, siekiant užtikrinti eksperimento patikimumą ir palyginamumą.

Smėlio frakcija 0/4 nurodo, kad jo dalelių dydis svyruoja nuo 0 iki 4 mm. Tai yra esminė betono mišinio sudedamoji dalis, kuri užtikrina tankio ir apdirbamumo kontrolę. Prieš naudojimą smėlis buvo išdžiovintas ir pasvertas, siekiant kontroliuoti jo drėgnį ir užtikrinti tikslų vandens/cemento santykį visuose mišiniuose.

2.1.8. Žvirgždo skalda 4/16 frakcijos

Stambusis užpildas betono mišinyje buvo 4/16 frakcijos žvirgždo skalda. Tai yra natūralios kilmės smulkinto akmens mišinys, gaunamas skalūno žvirgždo rūšiavimo ir smulkinimo būdu. Šis užpildas pasirinktas kaip standartinė, patikima statybinė medžiaga, atitinkanti LST EN 12620:2002 „*Betono užpildai*“ [44] standarto reikalavimus.

Skaldos frakcija 4/16 nurodo, kad dalelių dydis svyruoja nuo 4 iki 16 mm. Stambusis užpildas yra esminis betono tūrio komponentas, užtikrinantis reikiamą betono stiprį ir sumažinantis šiluminį plėtimąsi. Siekiant išlaikyti tikslų vandens/cemento santykį, prieš sumaišymą buvo kontroliuojamas skaldos drėgnis ir atsižvelgiama į žvirgždo skaldos absorbcijos savybes.

2.2. Laboratorinių tyrimų metodologija

2.2.1. Malto stiklo tariamojo tankio nustatymas

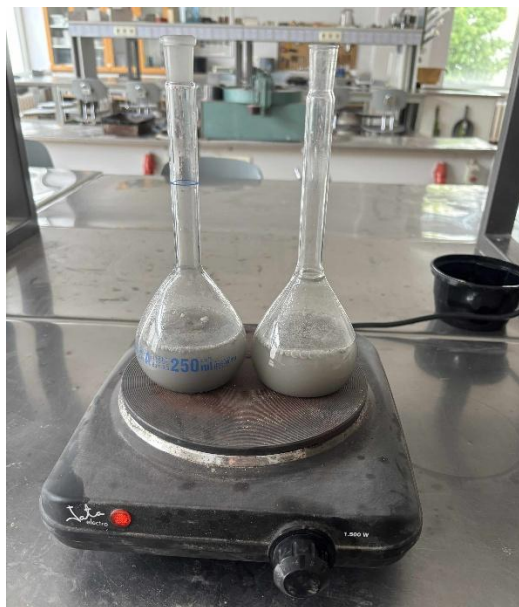
Maltam atliekų stiklui buvo svarbu nustatyti tariamąjį tankį ir jį palyginti su jau žinomu stiklo tankiu. Taip galima nustatyti įvairių žaliavoje esančių priemonių kieki.

Medžiagos tankis yra medžiagos vienetinio tūrio masė, paprastai išreiškiama kilogramais kubiniame metre (kg/m^3). Natūralios medžiagos gali būti tankios, poringos, birios, sutankintos, purios, sausos, drėgnos, įmirkusios ar kitokios būsenos. Jų tankis visada priklauso nuo būsenos, dėl to kalbant apie medžiagos tankį būtina nurodyti jos būseną. Standartuose pateikiami tokie tankio apibūdinimai: tariamasis tankis, tūrinis tankis, piltinis tankis ir santykinis tankis. Priklausomai nuo medžiagos būsenos taikomas atitinkamas jos tankio nustatymo būdas. Medžiagos tankiai ir skaitinės vertės nustatomos pagal standarte nurodyta metodiką [45].

Tariamasis tankis yra absoliučiai tankios (be porų) medžiagos tūrio vieneto masė. Medžiagos tariamasis tankis (kg/m^3) arba (Mg/m^3) nustatomas laboratorijoje ir išreiškiamas medžiagos masės m ir jos tūrio V santykiu. Tankis – tai natūralios būsenos medžiagos masės ir tūrio, įskaitant uždaras ir atviras poras, santykis [45].

Uolienos yra daugiau ar mažiau poringos, todėl nustatant tariamąjį tankį, jos smulkiai sumalamos, kad neliktų porų. Tiriamos medžiagos milteliai išdžiovinami džiovintame krosnelėje (110 ± 5) °C temperatūroje iki pastovios masės ir ataušinami iki kambario temperatūros. Per smulkų sieta persijoti milteliai supilami į eksikatorį. Bandymui pasveriami, du bandiniai po 10–15 g. Švarus sausas piknometras pasveriamas 0,05 g tikslumu. Į piknometrą supilami milteliai (~10 g). Piknometras su milteliais pasveriamas 0,05 g tikslumu. Į piknometrą su milteliais pripilama distiliuotojo vandens iki 2/3 piknometro tūrio. Piknometro turinys permaišomas jį sukratant. Truputį paverstas piknometras

statomas į smėlio arba vandens vonią. Oro burbuliukams pašalinti piknometro turinys virinamas 15–20 min (žr. 5 pav.). Paskui piknometras ataušinamas iki kambario temperatūros, jo išorinis paviršius nusausinamas. Į piknometrą su milteliais pripilama distiliuotojo vandens iki žymės (žiūrima pagal vandens menisko apačią) ir pasverama 0,05 g tikslumu. Piknometro turinys išpilamas ir išplaunamas. Į jį pripilama distiliuotojo vandens iki žymės (žiūrima pagal vandens menisko apačią) ir pasverama 0,05 g tikslumu. Bandymas kartojamas su antruoju bandiniu [45].



5 pav. Piknometrai su milteliais ir vandeniu.

Tirtos medžiagos tariamasis tankis P_0 , kg/m^3 skaičiuojamas pagal 1.1 formulę [45].

$$P_0 = \frac{(m - m_1) \times \rho_v}{m - m_1 + m_2 - m_3}; \quad (1)$$

čia: m – piknometro su milteliais masė, g;

m_1 – tuščio piknometro masė, g;

m_2 – piknometro su distiliuotu vandeniu masė, g;

m_3 – piknometro su milteliais ir distiliuotu vandeniu masė, g;

ρ_v – vandens tankis, kg/m^3 priklauso nuo oro temperatūros.

2.2.2. Betono mišinio sudėtis ir bandinių formavimas

Eksperimentinis planas apėmė 3 bandomųjų mišinių seriją, įskaitant kontrolinį mišinį (K). Kontrolinis mišinys – kaip mišinio rišiklis naudojamas tik cementas, 10 % sudėčiai – 10 procentų cemento pakeičiama apdorotomis elektronikos stiklo atliekomis ir 15 % sudėčiai – 15 procentų cemento pakeičiama apdorotomis elektronikos stiklo atliekomis. Visos mišinių sudėtys buvo projektuojamos siekiant pagaminti C30/37-XC2-XF3-XA1-SF1 betono klasė. Numatytas vandens cemento santykis V/C yra 0,45.

Visuose mišiniuose buvo naudojami tie patys cheminiai priedai: *Sika® ViscoCrete® D-190* (superplastiklis), *SikaControl® AER-200 P* (oro įtraukimo priedas) ir *Sika® Stabilizer-4 R* (stabilizatorius), kurių dozavimas buvo nustatytas atitinkamai 0,9 %, 0,25 % ir 0,35 % nuo rišiklio masės. Visuose mišiniuose buvo numatytas 4,0 % oro kiekis.

Naudotos sudėtys pateikiamos 7, 8 ir 9 lentelėse.

7 lentelė. Kontrolinio mišinio sudėtis

Medžiaga	Dozavimas, %	Medžiagos kiekis reikalingas pagaminti 1m ³ mišinio, kg	Medžiagos kiekis reikalingas pagaminti 15 ltr. mišinio
Cementas CEM I 42,5R	-	407	6,105 kg
<i>Sika® ViscoCrete® D-190</i>	0,9	3,66	54,95 g
<i>SikaControl® AER-200 P</i>	0,25	1	15,3 g
<i>Sika® Stabilizer-4 R</i>	0,35	1,4	21,5 g
Oro kiekis	-	4,0 %	-
V/C (Vanduo)	0,45	179	2,69 kg
Smėlis 0/4 frakcijos	-	851	12,77 kg
Žvirgždo skalda 4/16 frakcijos	-	852	12,78 kg

8 lentelė. 10% mišinio sudėtis

Medžiaga	Dozavimas, %	Medžiagos kiekis reikalingas pagaminti 1m ³ mišinio, kg	Medžiagos kiekis reikalingas pagaminti 15 ltr. mišinio
Cementas CEM I 42,5R	-	370	5,55 kg
Maltos stiklo atliekos	10	37	0,555 kg
<i>Sika® ViscoCrete® D-190</i>	0,9	3,66	54,95 g
<i>SikaControl® AER-200 P</i>	0,25	1	15,3 g
<i>Sika® Stabilizer-4 R</i>	0,35	1,4	21,5 g
Oro kiekis	-	4,0 %	-
V/C (Vanduo)	0,45	179	2,69 kg
Smėlis 0/4 frakcijos	-	851	12,77 kg
Žvirgždo skalda 4/16 frakcijos	-	852	12,78 kg

9 lentelė. 15% mišinio sudėtis

Medžiaga	Dozavimas, %	Medžiagos kiekis reikalingas pagaminti 1m ³ mišinio, kg	Medžiagos kiekis reikalingas pagaminti 15 ltr. mišinio
Cementas CEM I 42,5R	-	345,95	5,190 kg
Maltos stiklo atliekos	15	61,05	0,915 kg
<i>Sika® ViscoCrete® D-190</i>	0,9	3,66	54,95 g
<i>SikaControl® AER-200 P</i>	0,25	1	15,3 g
<i>Sika® Stabilizer-4 R</i>	0,35	1,4	21,5 g
Oro kiekis	-	4,0 %	-
V/C (Vanduo)	0,45	179	2,69 kg
Smėlis 0/4 frakcijos	-	851	12,77 kg
Žvirgždo skalda 4/16 frakcijos	-	852	12,78 kg

Betono mišiniai buvo maišomi laboratorinėje priverstinio veikimo maišyklėje pagal LST EN 12390-1:2021 metodiką [46]. Pirmiausia sumaišytos sausosios medžiagos, po to įpilta dalis vandens, sausos medžiagos su vandeniu sumaišytos. Po to pilamas visas numatytas rišiklis ir maišant visą mišinį iš lėto pilami priedai, maišant dar 2 minutes iki vienalytės masės. Iškart po pagaminimo buvo atliekami šviežio betono tyrimai.

Iš kiekvieno mišinio buvo suformuota po 12 kubinių 100×100×100 mm bandinių (žr. 6 pav.).



6 pav. Suformuoti bandiniai

2.2.3. Mišinio tankio nustatymas

Mišinio tankis yra esminis šviežio betono rodiklis, leidžiantis patikrinti, ar faktinis betono tūris, gautas sumaišius sudedamąsias dalis, atitinka teorinį projektuotą tankį. Šviežio betono tankis buvo nustatomas pagal LST EN 12350-6 [47].

Tyrimui buvo naudojamas sertifikuotas indas, kurio tūris yra tiksliai žinomas (8 litrai). Indas iš pradžių buvo pasvertas tuščias. Iš karto po sumaišymo betono mišinys buvo pilamas į indą. Kadangi tyrimas atliekamas su savaime sutankėjančiu betonu, papildomas tankinimas nebuvo reikalingas, siekiant išvengti segregacijos ar oro įtraukimo pokyčių, taip pat atkartojant realias SSB naudojimo sąlygas. Mišinio paviršius inde buvo atsargiai išlyginamas lygia liniuote. Indas su pripildytu betonu buvo pasvertas. Šviežio betono tankis buvo apskaičiuotas pagal formulę:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}; \quad (2)$$

čia: m_1 – tuščio indo masė, g;

m_2 – indo su mišiniu masė, g;

V – indo tūris, m³.

Gautas tankis, buvo naudojamas siekiant patvirtinti betono gamybos tikslumą ir patikrinti, ar maltos stiklo atliekos darė įtaką bendram mišinio tankiui.

2.2.4. Mišinio pasklidimo bandymas

Pasklida yra pagrindinis šviežio savaime sutankėjančio betono mišinio rodiklis, apibūdinantis jo gebėjimą savaime tekėti ir pasiskirstyti be papildomos vibracijos. Bandymas atliktas pagal standartą LST EN 12350-8 [48].

Mišinys iš karto po sumaišymo buvo supiltas į kūgį, pastatytą ant lygios, neįgeriančios plokštės. Kūgis buvo užpildytas be jokio tankinimo. Po 30 sekundžių kūgis buvo vertikaliai ir tolygiai pakeltas. Betono masė, paveikta tik savo svorio, pradėjo sklisti. Pradėtas matuoti laikas, per kurį SSB mišinys pasiekia 500 mm skersmenį (žymimas kaip t_{500}), apibūdinantis betono užpildymo greitį (žr. 7 pav.).

Galutinis pasklidimo skersmuo buvo matuojamas centimetro tikslumu, išmatuojant du skersmenis, kurie yra statmeni vienas kitam. Pasklidimo rezultatas yra šių dviejų matavimų vidutinė vertė. Mišinio pasklida turėjo atitikti SF1 klasę, nurodytą projektinėje klasėje C30/37-XC2-XF3-XA1-SF1. Bandymas laikomas tinkamu tik tuo atveju, jei per bandymo eigą nebuvo stebima jokia segregacija ar vandens atsiskyrimo požymių.



7 pav. Pasklidimo bandymo kūgis ir padėklas su 500 mm skersmens žyme

Paslankumas, matuojamas sklido bandymu pagal standartą LST EN 12350-8 [48], leidžia nustatyti, ar betono mišinys yra savaime sutankinantis betonas (SSB) ir kokiai sklido klasei jis priklauso. Kad mišinys būtų laikomas savaime sutankinančiu betonu ir atitiktų numatytą SF1 sklido klasę, jis turi pasiekti 10 lentelėje pateiktus rodiklius.

Remiantis LST EN 12350-8 [48], kad mišinys būtų laikomas savaime sutankinančiu, t_{500} reikšmė neturėtų viršyti 5 sekundžių.

10 lentelė. Pasklidimo klasių reikalavimai [48]

Sklidimo klasė	Diametras, mm
SF1	550–650
SF2	660–750
SF3	760–850

2.2.5. Oro kiekio mišinyje nustatymas

Oro kiekis šviežiame betono mišinyje buvo nustatomas slėgio metodu, vadovaujantis standartu LST EN 12350-7 „*Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai*“ [49]. Tikslus oro kiekio matavimas yra būtinas, ypač kai naudojamos orą įtraukiančios įmaišos (*SikaControl® AER-200 P*), siekiant užtikrinti betono atsparumą šalčiui ir tenkinti XF3 poveikio klasę.

Tyrimas buvo atliktas naudojant oro kiekio matuoklį. Prietaiso indas buvo pripildytas šviežio betono, užtikrinant tikslų sutankinimą be papildomo oro įtraukimo, kas pasiekama kalimo metodu pagal standarto reikalavimus. Po indo viršaus išlyginimo, matuoklio dangtis buvo uždėtas ir užfiksuotas.



8 pav. Slėgio kamera ir matuoklė

Oro kiekis buvo nustatomas laipsniškai didinant slėgį matavimo kameroje (žr. 8 pav.) ir stebint vandens lygio pokytį, kuris tiesiogiai koreliuoja su oro kiekiu betone. Matavimo rezultatas išreiškiamas procentais nuo betono tūrio. Šis rezultatas leido patikrinti, ar faktinis oro kiekis mišiniuose (K, 10 % ir 15 %) atitinka projekte numatytą 4,0 % vertę. Taip pat ši kontrolė yra ypač svarbi tiriant elektronikos stiklo atliekų poveikį betono savybėms, kadangi stiklo dulkės gali veikti kaip paviršiaus aktyvioji medžiaga ir paveikti įtraukto oro burbuliukų stabilumą bei dydį.

2.2.6. Hidratacijos eigos tyrimas pusiau adiabatiniu kalorimetrijos metodu

Cemento tešlos, modifikuotos maltu elektroninių atliekų stiklu, hidratacijos procesas ir šilumos išsiskyrimo kinetika tiriama taikant pusiau adiabatinę kalorimetriją. Bandymas atliekamas vadovaujantis LST EN 196-9:2010 [50] standartu.

Adiabatinis procesas termodinamikoje apibūdinamas kaip sistemos būsenos kitimas, kurio metu nevyksta šilumos mainai su aplinka. Pusiau adiabatinio metodo principas grindžiamas šilumos balanso matavimu: šviežiai paruošta rišiklio tešla talpinama į specializuotą kalorimetrą, kuriame nenutrūkstamai registruojama bandinio temperatūra viso kietėjimo metu. Kadangi medžiaga nėra visiškai izoliuota nuo aplinkos (vyksta nedideli šilumos nuostoliai per kalorimetro sienelės), šis procesas vadinamas pusiau adiabatiniu.

Tyrimo metu cemento hidratacijos metu išsiskyręs bendras šilumos kiekis Q yra lygus kalorimetre sukauptos šilumos Q_{suk} ir per bandymo laikotarpį į aplinką prarastos šilumos Q_{prar} sumai.

$$Q = mc(T_t - T_0) + \alpha \int_0^t (T_t - T_a) dt; \quad (3)$$

čia: Q – hidratacijos šiluma;

m – bandinio masė;

c – savitoji šiluma;

T_t – bandinio temperatūra laiku t ;

T_0 – pradinė temperatūra;

A – kalorimetro šilumos nuostolių koeficientas.

Eksperimento metu paruošiama cementinė tešla su skirtingais malto stiklo atliekų kiekiais (kontrolinis, 5 %, 10 % ir 15 %). Mišinys supilamas į izoliuotą indą, įstatomas termometras ir fiksuojamas temperatūros pokytis laike kol vyksta egzoterminė reakcija.



9 pav. Mėginiai įstatyti į izoliuotą indą

Pagrindiniai vertinami parametrai yra:

- maksimali pasiekta temperatūra T_{max} ;
- laikas, per kurį pasiekta maksimali temperatūra;
- temperatūros kilimo greitis (hidratacijos intensyvumas).

Šiuo tyrimu siekiama įvertinti, kaip malto elektroninių atliekų stiklo priedas, veikiantis kaip dalinis cemento pakaitalas, keičia rišiklio hidratacijos eigą, indukcinio periodo trukmę bei bendrąją reaktyvumą ankstyvojoje kietėjimo stadijoje.

2.2.7. Gniuždymo stiprio nustatymas

Gniuždymo stipris yra pagrindinė sukietėjusio betono mechaninė charakteristika, leidžianti patikrinti, ar mišiniai atitinka projekte numatytą C30/37 stiprio klasę, ir įvertinti maltų stiklo atliekų poveikį stiprumui. Stiprio gniuždant nustatymas buvo atliktas pagal standartą LST EN 12390-3[51].

Bandymams atlikti naudotas „Toni Technik“ bandymo presas. Šis įrenginys skirtas lenkimo ir gniuždymo bandymams atlikti, deformacijoms bei medžiagų tamprumo moduliui nustatyti. Bandymo mašinos maksimali gniuždymo galia siekia 600 kN.

Stipris buvo tiriamas trimis skirtingais amžiaus tarpsniais: 7, 14 ir 28 parų. Kiekvienam mišiniui (K, 10 % ir 15 %) ir kiekvienam amžiaus tarpsniui buvo tiriami trys 100×100×100 mm kubiniai bandiniai. Prieš bandymą, bandiniai buvo išimami iš vandens, nuvalomi, išmatuojamos jų kraštinės ir nustatomas jų tankis.

Bandymas atliktas naudojant hidraulinę presą. Bandinys dedamas į presą centrinėje apkrovos plokštumos zonoje. Apkrova buvo didinama tolygiai, pastoviu 5 kN/s greičiu, iki pat bandinio sunaikinimo. Kiekvieno bandinio gniuždymo stipris buvo apskaičiuotas pagal santykį tarp didžiausios sunaikinimui pasiektos apkrovos ir nominalaus apkrovos paviršiaus ploto, naudojant formulę:

$$f_{c,cub} = \beta \frac{F}{A_c}; \quad (4)$$

čia: F – didžiausia pasiekta apkrova, N;

A_c – nominalus apkrovos ploto paviršius, mm²;

β – koeficientas, įvertinantis kubelių dydį, kai kraštinė 100 mm, $\beta = 0,95$.

Galutinė stiprio gniuždant vertė kiekvienam amžiaus tarpsniui nustatyta kaip trijų bandinių rezultatų aritmetinis vidurkis. Šie rezultatai buvo naudojami atliekant analizę, siekiant nustatyti stiklo atliekų poveikį betono stipriui.

2.2.8. Betono uždaro / atviro poringumo tyrimas

Betono vandens įgeriamumo kinetikos ir atsparumo šalčiui tyrimas atliekamas vadovaujantis standartais GOST 12730.4–2020 [52] ir LST 1428.19:2016 [53].

Kubo formos (100×100×100 mm) bandiniai suskaldomi į 4 panašaus dydžio dalis.



10 pav. Suskaldyti bandiniai

Bandiniai džiovinami ventiliuojamoje džiovykloje, palaikant (105 ± 5) °C temperatūrą, kol per 24 valandas masė nekito daugiau nei 0,2 %. Prieš sveriant, mėginys hermetišrame inde buvo atvėsintas iki kambario temperatūros. Vėliau jis buvo merkiamas į vandenį 15 min., 60 min., 24 val. ir 48 val. – kiekvienu šiuo momentu bandinys išimamas, jo paviršius nusausinamas drėgnu skudurėliu, pašalinant vandens perteklių, ir mėginys pasveriamas. Po 48 valandų taip pat atliekamas mėginio svėrimas vandenyje. Pagal gautas mases apskaičiuojamas betono vandens įgėris ir poringumo rodikliai, atviras ir uždaras poringumas.

Vandens įgėris pagal masę apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_p = \frac{m_{48} - m_s}{m_s} \cdot 100, \%; \quad (5)$$

čia: m_{48} – bandinio masė po 48h mirkinimo, g;

m_s – sauso bandinio masė, g.

Tankis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$T = \frac{m_s}{m_{48} - m_v} \cdot 1000, \text{ kg/m}^3; \quad (6)$$

čia: m_v – bandinio masė vandenyje, g.

Vandens įgėris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_{p(t)} = \frac{W_p \cdot T}{1000}, \%. \quad (7)$$

Vandens įgėris po tam tikro laiko apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_x = \frac{m_x - m_s}{m_s} \cdot 100, \%; \quad (8)$$

čia: m_x – bandinio masė po X laiko mirkinimo, g;

m_s – sauso bandinio masė, g.

Pagal GOST 12730.4–2020 [52] nomogramas nustatomi porų struktūros rodikliai – porų vienodumo koeficientas α ir porcijų pasiskirstymo pagal dydį rodiklis λ_1 , iš kurių apskaičiuojamas vidutinis porų dydžio rodiklis. Vidutinių porų dydžių rodiklis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \frac{1}{\alpha}; \quad (9)$$

čia: α – rodiklis, parenkamas iš GOST 12730.4–2020 [52];

λ_1 – rodiklis, parenkamas iš GOST 12730.4–2020 [52].

Nustatomas bendras betono poringumas pagal formulę:

$$P_p = \left(1 - \left(\frac{T}{2690}\right)\right) \cdot 100, \%; \quad (10)$$

čia: T – bandinio tankis, kg/m³.

Nustatomas atviras betono poringumas pagal formulę:

$$P_a = W_{p(t)}, \%; \quad (11)$$

čia: $W_{p(t)}$ – Vandens įgėris, %.

Nustatomas uždaras betono poringumas pagal formulę:

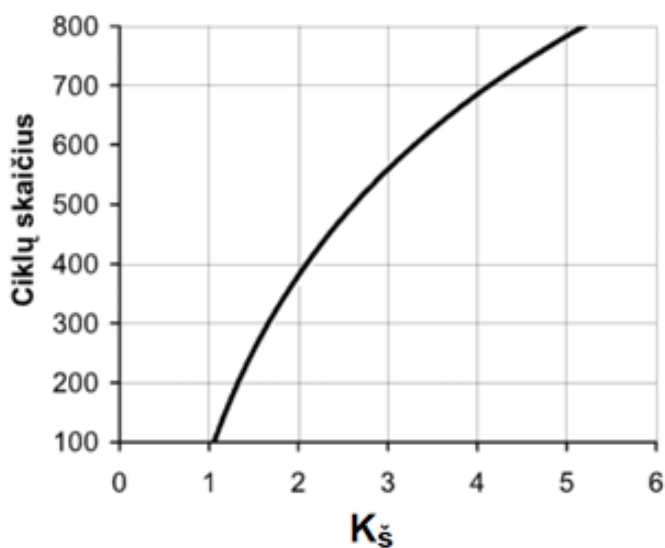
$$P_u = P_p - P_a, \%. \quad (12)$$

Nustatytas atviras ir uždaras poringumas leidžia apskaičiuoti atsparumo šalčiui kriterijų, kuris išreiškiamas santykiu tarp uždarų ir atvirų porų. Atsparumo šalčiui kriterijus K_s apskaičiuojamas pagal formulę:

$$K_s = \frac{P_p}{0,09 \cdot P_a}, \%; \quad (13)$$

čia: T – bandinio tankis, kg/m^3 .

Remiantis šiuo kriterijumi galima prognozuoti betono atsparumą užšaldymo–atšildymo ciklams (žr. 11 pav.). Metodika leidžia įvertinti betono mikrostruktūrą, vandens migracijos intensyvumą ir šalčiui atsparumo potencialą.



11 pav. Ciklų skaičiaus priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus K_s [52]

2.2.9. Kapiliarinio užšalimo/atšilimo tyrimas

Šio tyrimo tikslas buvo įvertinti trijų skirtingų betoninių mišinių atsparumą šalčiui ir ledo tirpdymo druskoms, taikant modifikuotą kapiliarinio vandens įsiurbimo ir užšalimo-atšilimo metodiką. Bandymas buvo orientuotas į paviršinę eroziją, sukliamą kapiliariniu būdu į betoną įsiskverbusio 3% natrio chlorido (NaCl) tirpalo. Atsižvelgiant į laboratorijos galimybes, buvo pasirinktas supaprastintas vizualinis vertinimas, papildytas masės nuostolių matavimais.

Tyrimui buvo paruošti trijų skirtingų sudėčių betoniniai bandiniai, kurių matmenys buvo 100x100x100 mm. Bandiniai buvo kietinami vandenyje 28 dienas.

Bandymas atliktas užtikrinant vienpusį šilumos ir skysčio srautą per bandomąjį paviršių. Bandiniai buvo dedami į indus, pripildytus 3% NaCl tirpalo (žr. 12 pav.). Tirpalo lygis buvo palaikomas 1–2 cm aukštyje nuo bandinio pagrindo paviršiaus, užtikrinant kapiliarinę drėgmės įsiurbimą tik per vieną ploto vienetą.



12 pav. Bandiniai pamerkti į NaCl tirpalą

Indai su bandiniais buvo patalpinti į ciklinį šaldytuvą, kuriame automatiškai atliekami užšalimo-atšilimo ciklai. Kiekvienas ciklas truko nustatytą laiką, temperatūros svyravo nuo -5 iki +10 laipsnių Celsijaus. Po 28 ciklų buvo atliktas vertinimas, kurio metu buvo fiksuojami paviršiaus pažeidimai ir bendra būklė. Pažeidimo lygis buvo nustatomas dviem būdais: vizualiniu įvertinimu ir masės nuostolio matavimu.

Masės pokytis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta m_n = \frac{m_{pr} - m_n}{m_{pr}} \cdot 100, \%; \quad (14)$$

čia: m_{pr} – pradinė bandinio masė, g;
 m_n – bandinio masė po n ciklų, g.

Siekiant įvertinti vidinės betono struktūros ir mikroįtrūkių poveikį po šalčio ir druskų poveikio, buvo atliktas gniuždomojo stiprio nustatymas pagal LST EN 12390-3 standartą [51]. Atsparumas šalčiui struktūriniu požiūriu įvertinamas gniuždomojo stiprio sumažėjimo koeficientu K , palyginant stiprį po ciklų su pradiniu stipriu:

$$K = \frac{f_{cm,n}}{f_{cm,pr}} \cdot 100, \%; \quad (15)$$

čia: $f_{cm,n}$ – betono gniuždomasis stipris po tyrimo, MPa,;
 $f_{cm,pr}$ – pradinis betono gniuždomasis stipris, MPa.

Kai K reikšmė yra artima 1, tai rodo labai gerą betono atsparumą šalčiui ir ledo tirpdymo druskoms, struktūros požiūriu.

3. Rezultatai ir analizė

3.1. Malto stiklo tariamasis tankis

Maltų elektronikos stiklo atliekų tariamojo tankio nustatymas buvo atliktas piknometrinio metodu. Tariamasis tankis yra absoliučiai tankios (be porų) medžiagos tūrio vieneto masė ir yra esminis žaliavos kokybės rodiklis, leidžiantis įvertinti galimų priemaišų buvimą, palyginti su žinoma gryno stiklo tankio verte. Tyrimas atliktas su džiovintais milteliais, kurių tūris buvo nustatytas virinant distiliuotame vandenyje, siekiant pašalinti visus oro burbuliukus ir gauti tikslią porų neturinčios medžiagos tūrio vertę.

Tariamoji atliekų tankio vertė buvo apskaičiuota pagal metodologijoje nurodytą formulę (1), kurioje atsižvelgiama į piknometro su milteliais, tuščio piknometro, piknometro su distiliuotu vandeniu ir piknometro su milteliais bei vandeniu masės pokyčius.

Atlikus matavimus buvo gauti pradiniai duomenys, pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. Malto stiklo tankio matavimo duomenys

Rodiklis	I malimas		II malimas		III malimas	
	I mėginys	II mėginys	I mėginys	II mėginys	I mėginys	II mėginys
m, g	76,26	132,85	130,4	75,31	132,17	135,83
m ₁ , g	66,2	122,8	122,82	66,23	118,65	122,81
m ₂ , g	315,82	371,84	372,05	315,81	367,33	371,82
m ₃ , g	320,91	376,66	375,19	319,99	374,13	378,21
Tankis, kg/m ³	2024,15	1921,6	1707,2	1853,1	2011,9	1963,8

Vandens tankis buvo pasirinktas 1000 kg/m³.

Iš gautų duomenų buvo apskaičiuotas II malimo I mėginio maltų stiklo atliekų tankis:

$$P_0 = \frac{(m - m_1) \times \rho_v}{m - m_1 + m_2 - m_3} = \frac{(130,4 - 122,82) \times 1000 \times 10^3}{130,4 - 122,82 + 372,05 - 375,19} = 1707,2 \text{ kg/m}^3; \quad (16)$$

čia: m – piknometro su milteliais masė, g;

m¹ – tuščio piknometro masė, g;

m² – piknometro su distiliuotu vandeniu masė, g;

m³ – piknometro su milteliais ir distiliuotu vandeniu masė, g;

ρ_v – vandens tankis, kg/m³ priklauso nuo oro temperatūros.

Naudojant formulę (1) apskaičiuotas ir kitų mėginių tariamasis tankis.

$$P_{0,\text{vid}} = \frac{2024,15 + 1921,6 + 1707,2 + 1853,1 + 2011,9 + 1963,8}{6} = 1913,6 \text{ kg/m}^3. \quad (17)$$

Maltų elektronikos stiklo atliekų vidutinis tariamasis tankis yra 1913,16 kg/m³.

Standartinis kalcio-natrio stiklo (įprastinio langų, butelių stiklo) tariamasis tankis literatūros šaltiniuose paprastai nurodomas nuo 2500 iki 2600 kg/m³. Nustatytas maltų elektronikos stiklo

atliekų vidutinis tariamasis tankis, lygus $1913,6 \text{ kg/m}^3$ yra $500\text{--}600 \text{ kg/m}^3$ mažesnis už norminį stiklo tankį.

Akivaizdus tariamojo tankio sumažėjimas, palyginti su grynu stiklu, rodo, kad maltose atliekose yra didelė dalis lengvesnių priemaišų. Elektronikos atliekų stikle gali būti organinių likučių, plastiko, keramikos dalių arba lengvesnių frakcijų stiklo. Nors buvo atliekamas džiovinimas, šis žemas tankis indikuoja, kad gauta žaliava nėra cheminiu požiūriu grynas stiklas.

Tyrime stiklo atliekos naudojamos kaip dalinis cemento (kurio tankis yra apie 3100 kg/m^3) pakaitalas masės dalimis, žemesnis stiklo atliekų tankis yra svarbus mišinio tankiui. Cemento masės pakeitimas $1913,6 \text{ kg/m}^3$ tankio stiklu reiškia, kad lyginant su kontroliniu mišiniu, gauto modifikuoto betono mišinio tūris bus didesnis (jei masė išlieka ta pati) arba bus didesnis tuštumų kiekis. Šis tankio skirtumas gali neigiamai paveikti bendrą betono poringumą ir mechanines savybes, kas vertinama tiriant sukietėjusio betono tankį ir stiprį.

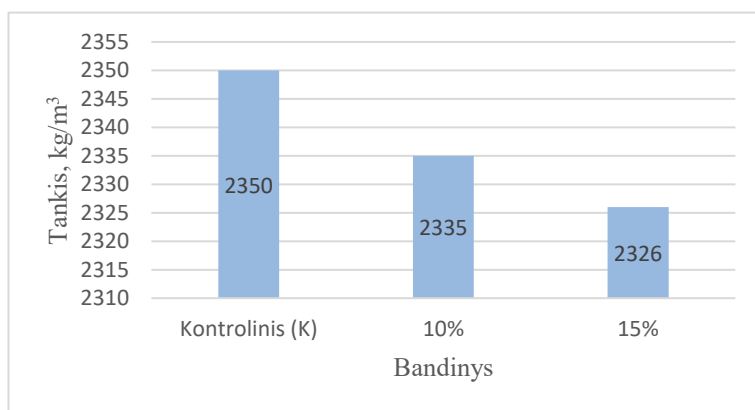
3.2. Mišinio tankis

Šviežio betono mišinio tankis yra vienas pagrindinių technologinių rodiklių, leidžiančių įvertinti betono mišinio homogeniškumą, komponentų dozavimo tikslumą bei faktinę išėigą tūrio atžvilgiu. Tyrimas atliktas vadovaujantis LST EN 12350-6 standarto reikalavimais [47], naudojant kalibruotą 8 litrų tūrio indą ir netaikant papildomo tankinimo (vibracijos), taip siekiant atspindėti realią SSB elgseną klojiniuose. Gauti eksperimentiniai rezultatai pateikiami 12 lentelėje.

12 lentelė. Šviežio mišinio tankis

Bandinių žymėjimas	Tankis, kg/m^3
Kontrolinis (K)	2350
10%	2335
15%	2326

Analizuojant gautus rezultatus nustatyta nuosekli šviežio betono tankio mažėjimo tendencija didinant maltų stiklo atliekų kiekį mišinyje. Didžiausias tankis užfiksuotas kontroliniame mišinyje (K), kurio sudėtyje naudotas tik cementas – jis siekė 2350 kg/m^3 . Pakeitus 10 % cemento maltomis stiklo atliekomis, mišinio tankis sumažėjo iki 2335 kg/m^3 (pokytis 0,64 %). Padidinus stiklo atliekų kiekį iki 15 %, tankis sumažėjo iki 2326 kg/m^3 (pokytis 1,02 %).



13 pav. Mišinio tankiai

Šį kitimą lemia fizikinių medžiagų savybių skirtumai. Cemento klinkerio dalelių savitasis tankis – 3100 kg/m^3 , maltų elektronikos stiklo atliekų nustatytas tankis yra 1913 kg/m^3 . Lengvesnė medžiaga mažina bendrąją mišinio tūrinę masę.

Tankio sumažėjimo nuokrypis neviršijo 1,1 %. Tai rodo, kad stiklo atliekų naudojimas neturi neigiamo poveikio mišinio stabilumui. Tyrimo, atlikto be priverstinio tankinimo, gautos reikšmės patvirtina, kad visi mišiniai (tiek kontrolinis, tiek modifikuoti) pasižymėjo pakankamu savaiminio sutankėjimo laipsniu – inde neliko didelių oro tarpų, kurie būtų lėmę tankio kritimą. Tai koreliuoja su 3.3 skyriuje aptariamais oro kiekio tyrimais, kurie parodė, kad oro porų tūris visuose mišiniuose išliko panašus.

Stiklo atliekų integravimas mažina SSB mišinio svorį, tačiau šis pokytis yra prognozuojamas, tiesiogiai priklausomas nuo pakeistos rišamosios medžiagos kiekio ir nepažeidžia mišinio struktūrinio vientisumo.

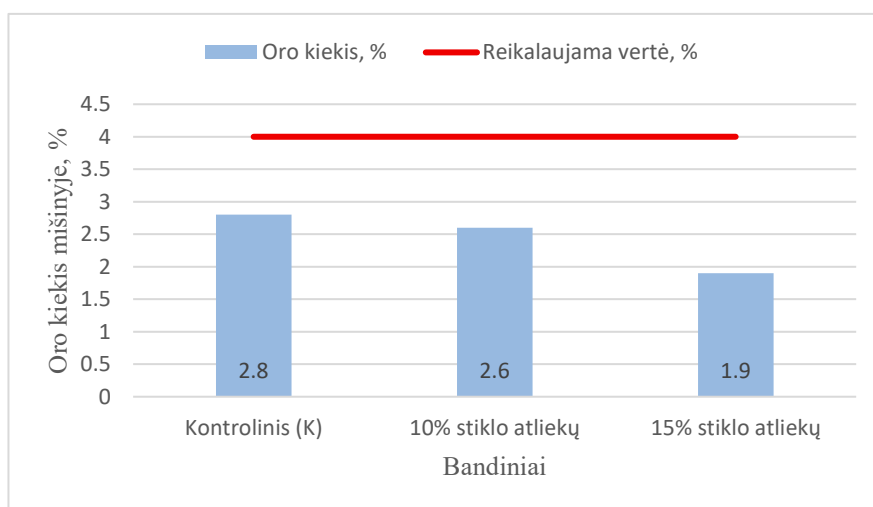
3.3. Oro kiekis mišinyje

Oro kiekio šviežiame betone tyrimas atliktas slėgio metodu, vadovaujantis LST EN 12350-7 standartu [49]. Šio bandymo tikslas buvo įvertinti betono atsparumą šalčiui, nes projekte numatyti XF3 poveikio klasei yra keliamas minimalus 4,0 % oro kiekio reikalavimas.

13 lentelė. Oro kiekis mišinyje

Bandinių žymėjimas	Oro kiekis mišinyje, %	Nuokrypis nuo projektinės reikšmės, %
Kontrolinis (K)	2,7	-1,3
10%	2,6	-1,4
15%	1,9	-2,1

Tirti mišiniai neatitiko minimalių oro kiekio reikalavimų (žr. 13 lentelėje), būtinų šalčio atsparumui užtikrinti. Kontrolinio mišinio (K) oro kiekis siekė tik 2,7 % (1,3 % mažiau nei projekte reikalaujama 4,0 % minimali riba). Mišinio su 10 % stiklo atliekų oro kiekis siekė 2,6 %. Didžiausias kritimas fiksuotas mišinyje su 15 % stiklo atliekų, kur oro kiekis sumažėjo iki 1,9 % (žr. 14 pav.).



14 pav. Oro kiekis mišinyje

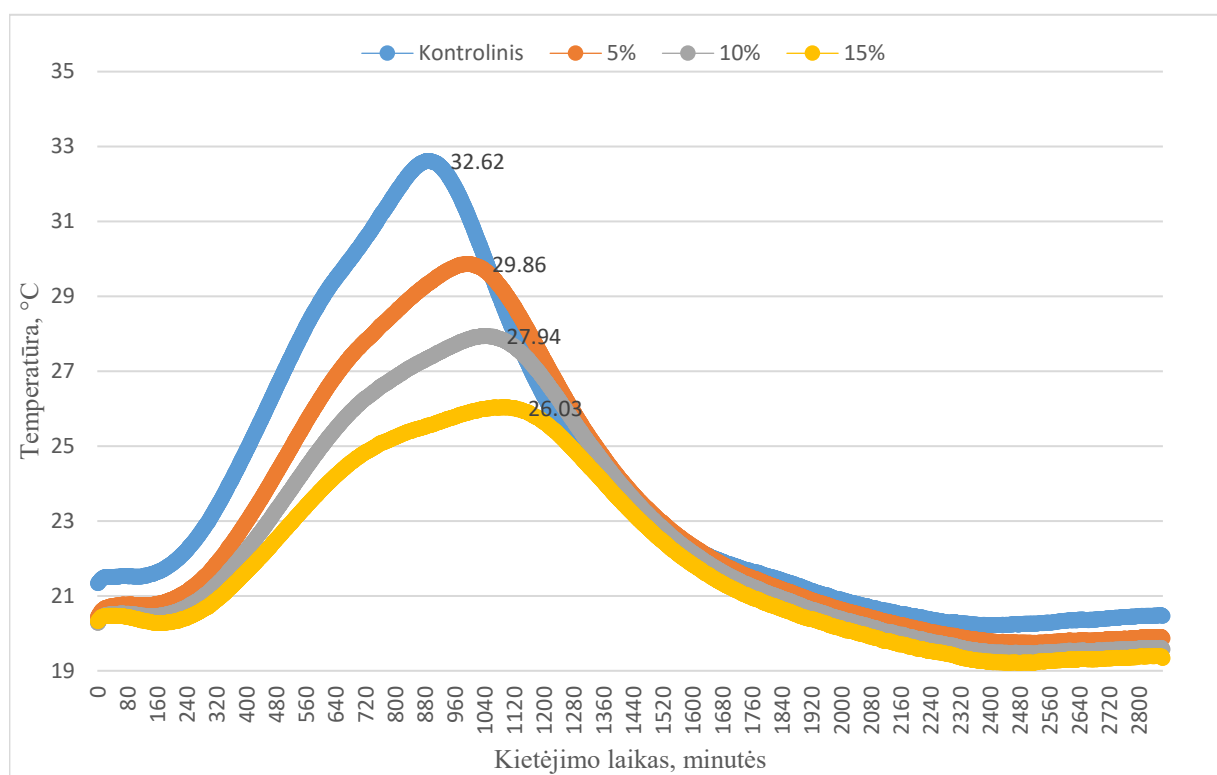
Gautų rezultatų dėsningumas rodo, kad maltos stiklo atliekos, pasižyminčios dideliu smulkumu, turi neigiamą poveikį oro įtraukiančios įmaišos efektyvumui. Stiklo dalelės, veikdamos kaip aktyvus paviršiaus modifikatorius, gali absorbuoti oro įtraukiančios įmaišos komponentus, taip sumažindamos laisvųjų molekulių, galinčių stabilizuoti oro burbuliukus, kiekį. Taip pat gali destabilizuoti jau susiformavusius oro burbuliukus dėl didesnio dalelių paviršiaus ploto, ypač savaime sutankinančio betono mišinyje, kurio klampumas yra mažesnis ir burbuliukai lengviau juda aukštyn.

Oro kiekio sumažėjimas gali nežymiai padidinti betono tankį ir stiprį, jis kritiškai sumažina ilgaamžiškumą, kadangi betonas, turintis mažiau nei 4,0 % oro porų, neatitiks XF3 klasės reikalavimų ir bus linkęs greičiau irti dėl užšalimo ir atšilimo ciklų. Ištyrus šių rezultatų mėginius, tolimesniems tyrimams būtina koreguoti oro įtraukiančios įmaišos dozavimą.

3.4. Hidratacijos eigos tyrimo pusiau adiabatinio kalorimetrijos metodu tyrimo rezultatai

Šiame tyrimo etape buvo analizuojama cemento tešlos, modifikuotos maltu elektroninių atliekų (EA) stiklu, hidratacijos kinetika ir šilumos išsiskyrimo procesai ankstyvojoje kietėjimo stadijoje. Bandymas atliktas vadovaujantis LST EN 196-9:2010 standartu [50], taikant pusiau adiabatinį sąlygų principą, kurio metu registruojama temperatūra viso kietėjimo metu. Tyrimo metu buvo paruošti mišiniai su skirtingais EA stiklo kiekiais (kontrolinis, 5 %, 10 % ir 15 %).

Pagrindiniai vertinami parametrai yra maksimali pasiekta temperatūra T_{max} , maksimalios temperatūros pasiekimo laikas t_{max} ir temperatūros kilimo greitis (hidratacijos intensyvumas), kurie atspindi EA stiklo įtaką indukcinio periodo trukmei ir bendrajam rišiklio reaktyvumui.



15 pav. Hidratacijos laiko ir šilumos priklausomybė

Gauti temperatūros kilimo kreivių rezultatai (žr. 15 pav.) ir iš jų nuskaityti esminiai hidratacijos proceso parametrai pateikti 14 lentelėje.

14 lentelė. Hidratacijos eigos rezultatai

Bandinių žymėjimas	Maksimali temperatūra ($T_{\max}$), °C	Piko pasiekimo laikas ($t_{\max}$), min
Kontrolinis (K)	32,5	~950
5% stiklo atliekų	29,8	~1000
10% stiklo atliekų	27,8	~1050
15% stiklo atliekų	26,0	~1100

Nustatyta aiški atvirkštinė priklausomybė tarp malto EA stiklo kiekio rišiklyje ir egzoterminės reakcijos intensyvumo. Kontrolinis mišinys pasiekė aukščiausią $T_{\max}$ (32,5 °C), nes jame vyko nevaržoma cemento hidratacija. Didinant EA stiklo dalį, stebimas nuoseklus šilumos išsiskyrimo slopinimas. Mišinys su 15 % EA stiklo pasiekė žemiausią $T_{\max}$ (26,0 °C), 6,5 °C sumažėjimą, lyginant su kontroliniu bandiniu. Šis $T_{\max}$ sumažėjimas yra tiesioginė praskiedimo efekto pasekmė: pakeitus dalį aktyvaus cemento klinkerio EA stiklu, sumažėja bendras hidratuojančių cemento mineralų kiekis, kuris lemia suminę išsiskiriančios šilumos energiją. Didžiausia stiklo frakcija (15 %) turėjo ir didžiausią hidratacijos šilumos sumažinimą.

Stiklo atliekų įvedimas į cemento tešlą lėtina visą hidratacijos procesą, prailgindamas laiką, per kurį pasiekiamas $T_{\max}$. Kontrolinis mišinys pasiekė piką per 950 min., 15 % EA stiklo mišinys šį piką pasiekė po 1100 min., tai yra 150 min. vėliau. Toks piko vėlavimo efektas yra būdingas pucolaninėms medžiagoms. Nors EA stiklas pasižymi pucolaniniu aktyvumu, ši reakcija yra lėtesnė nei pirminė cemento hidratacija. Stiklo dalelės veikia kaip inertiškesnis komponentas ankstyvojoje stadijoje, prailgindamas indukcinį periodą ir išskaidydamas šilumos išsiskyrimą ilgesniam laikui. Šis lėtėjimas yra ypač ryškus didesnėse koncentracijose.

Pusiau adiabatinės kalorimetrijos tyrimas patvirtino, kad malto EA stiklo įtraukimas į cemento tešlą efektyviai slopina ir lėtina egzoterminę hidratacijos reakciją. Šis efektas yra tiesiogiai proporcingas EA stiklo kiekiui ir yra naudingas masyvioms betono konstrukcijoms, kadangi sumažintas $T_{\max}$ ir ištęstas $t_{\max}$ sumažina terminio įtempio ir susitraukimo plyšių susidarymo riziką ankstyvojoje kietėjimo stadijoje. 15 % pakeitimas pasirodė esąs efektyviausias šilumos išsiskyrimo kontrolės požiūriu.

3.5. Mišinio pasklida

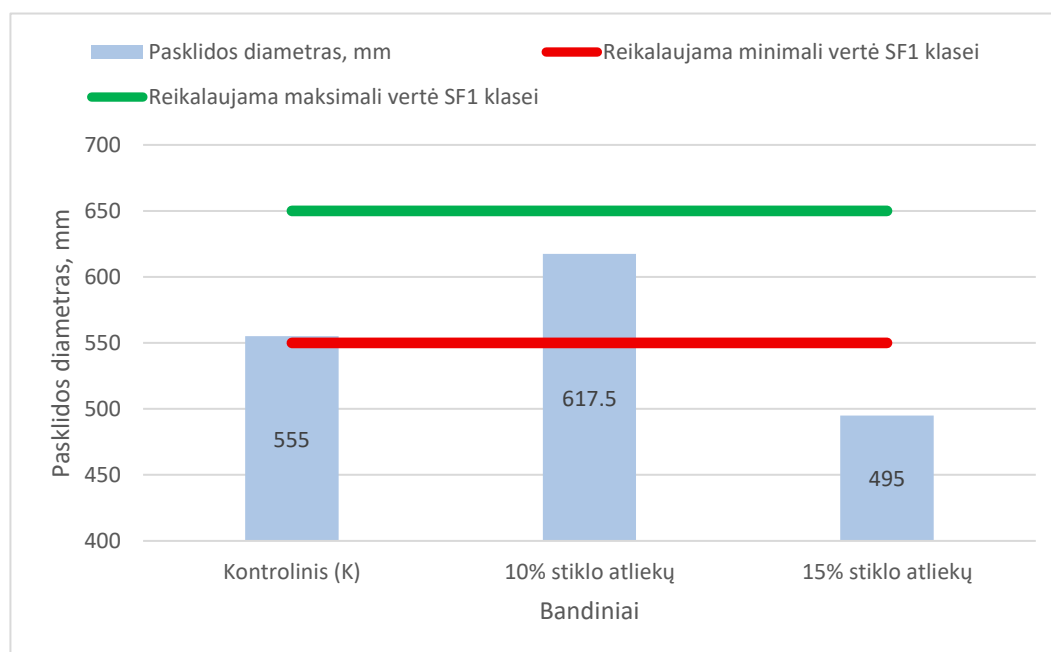
Pasklidos bandymas atliktas pagal LST EN 12350-8 standartą [48], siekiant įvertinti šviežio SSB takumą ir galimybes užpildyti klojinius veikiant tik savo svoriui. Tyrime nustatyta pasklidos klasė SF1, kurios reikalavimai yra 550 – 650 mm skersmuo ir t_{500} laikas neturi viršyti 5 s.

15 lentelė. Pasklidos rezultatai

Bandinių žymėjimas	T ₅₀₀ laikas, s	Pasklidos diametras, mm
Kontrolinis (K)	5,33	555
10%	4,81	617,5
15%	-	495

Nustatyta, kad stiklo atliekų kiekis turėjo teigiamą poveikį mišinių slankumo savybėms (žr. 15 lentelę). Kontrolinis mišinys (K) pasiekė 555 mm skersmenį, kas atitinka apatinę SF1 klasės ribą, tačiau t_{500} laikas viršijo 5 s ribą. Optimalias savybes parodė 10 proc. stiklo atliekų mišinys, kurio pasklida (617,5 mm) buvo SF1 klasės ribose, o t_{500} laikas 4,81 s patvirtino gerą tekėjimo ir užpildymo greitį.

15 % stiklo atliekų mišinio pasklidos skersmuo siekė 495 mm, t. y., 55 mm mažiau nei minimali SF1 klasės riba. Dėl nepakankamo tekamumo šis mišinys negali būti klasifikuojamas kaip SSB, t_{500} nefiksuotas. Šis kritinis slankumo pablogėjimas indikuoja, kad padidintas maltų stiklo atliekų specifinis paviršiaus plotas esant 15 proc. pakeitimui reikalauja papildomo superplastifikatoriaus kiekio. Mišinys tapo per klampus, prarado savaiminio sutankinimo gebą dėl per mažo superplastifikatoriaus kiekio mišinyje.

**16 pav.** Mišinio pasklidos rezultatai

3.6. Gniuždymo stipris

Tyrimas buvo atliktas siekiant įvertinti maltų stiklo atliekų poveikį betono gniuždymo stiprio raidai trijuose amžiaus tarpsniuose (7, 14 ir 28 d.) bei patikrinti, ar mišiniai atitinka projekte numatytą C30/37 stiprio klasę. Stiprio nustatymas atliktas pagal standartą LST EN 12390-3 [51], naudojant „Toni Technik“ presą. Galutinė gniuždymo stiprio vertė kiekvienam mišiniui apskaičiuota kaip trijų kubinių bandinių (100x100x100 mm) aritmetinis vidurkis. Gauti rezultatai pateikiami 16 lentelėje.

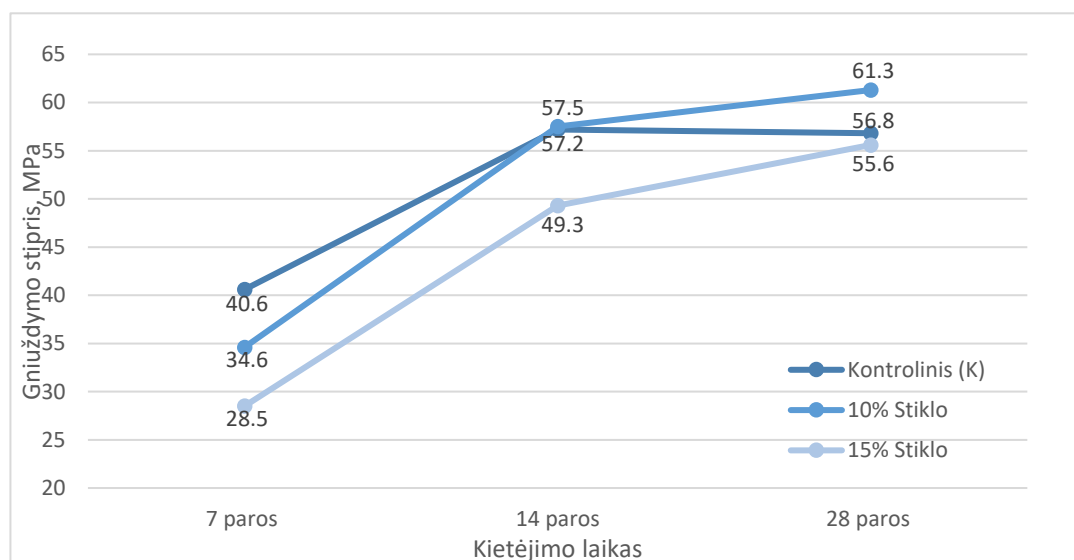
16 lentelė. Gniuždomojo stiprio rezultatai

Mišinio tipas	7 paros (MPa)	14 paros (MPa)	28 paros (MPa)
Kontrolinis (K)	40,6	57,2	56,8
10% Stiklo	34,6	57,5	61,3
15% Stiklo	28,5	49,3	55,6

Ankstyvuju kietėjimo laikotarpiu (7 paros) kontrolinis mišinys (K) parodė didžiausią gniuždymo stiprį, pasiekdamas 40,6 MPa. Abu mišiniai su stiklo atliekomis fiksavo mažesnes vertes: 10 % stiklo mišinys pasiekė 34,6 MPa, o 15 % stiklo mišinys – 28,5 MPa. Šis atsilikimas rodo, kad pradinėje stadijoje cemento dalies pakeitimas stiklo atliekomis lėmė bendrą stiprio sumažėjimą, ypač didelė dalis stiklo (15%) lėmė apie 30 % mažesnę stiprį nei kontrolinis betonas.

Po 14 parų kietėjimo gniuždymo stiprio raida pakito: mišinys su 10 % stiklo atliekų parodė ryškią pucolaninės reakcijos pradžią, pasiekdamas 57,5 MPa stiprį, kuris nežymiai viršijo kontrolinio mišinio stiprį (57,2 MPa). Tai signalizuoja, kad optimalus stiklo kiekis šiuo etapu tapo naudingas stiprumui. Mišinys su 15 % stiklo atliekų taip pat turėjo 80 % stiprio prieaugį, bet vis dar atsiliko nuo kontrolinio betono, pasiekęs 49,3 MPa.

Po 28 parų nustatyta, kad optimaliausias priedas buvo 10 % stiklo atliekų kiekis, kuris leido mišiniui pasiekti didžiausią stiprį – 61,3 MPa. Šis rezultatas 7,9 % viršijo kontrolinio betono stiprį (56,8 MPa) ir patvirtino teigiamą pucolaninės reakcijos poveikį ilgalaikiam stiprumui. Mišinys su 15 % stiklo atliekų, nepaisant ankstyvojo silpnumo, parodė didžiausią absoliutų stiprio prieaugį per visą laikotarpį, pasiekdamas 55,6 MPa stiprį, kuris tik 2,1 % atsiliko nuo kontrolinio mišinio.

**17 pav.** Bandinių gniuždymo stipris

Visi trys mišiniai – kontrolinis (56,8 MPa), 10 % stiklo (61,3 MPa) ir 15 % stiklo (55,6 MPa) – po 28 parų sėkmingai viršijo C30/37 klasės reikalaujamą kubinį stiprį (37 MPa).

3.7. Betono uždaro / atviro poringumo tyrimo rezultatai

Šiame etape buvo tiriami betono bandinių: K (kontrolinio), 10 ir 15 struktūriniai rodikliai. Tyrimas atliktas vadovaujantis tarpvalstybiniu standartu GOST 12730.4-78 [52]. Pagrindinis tyrimo tikslas – nustatyti betono tankio charakteristikas, porų tūrio pasiskirstymą (bendrąjį, atvirąjį ir uždarąjį poringumą) bei įvertinti porų struktūros parametrus (α ir λ), kurie lemia betono ilgaamžiškumą ir atsparumą šalčiui.

Bandiniai pagal GOST 12730.4-78 [52] metodologiją mirkinami vandenyje, pilnai panardinti visą tyrimo atlikimo laiką.



18 pav. Bandiniai mirkinami

Atlikus bandinių hidrostatinį svėrimą ir džiovinimą, nustatytos vidutinės sauso betono tankio ir sutrinto betono tankio reikšmės bei apskaičiuotas bendrasis poringumas. Gauti rezultatai pateikiami 17 lentelėje.

17 lentelė. Bandinių poringumo rezultatai

Mišinio tipas	Bendrasis poringumas, %	Atvirasis poringumas, %	Uždarasis poringumas, %
K	17,9	12,6	5,3
10	18,7	13,4	5,3
15	19,2	12,5	6,7

Mažiausiu bendrojo poringumu pasižymi kontrolinis bandinys K (17,9 %), bandiniai su daugiausia stiklo turi didžiausią bendrąjį poringumą (19,2 %). Tai rodo, kad daugėjant stiklo atliekų betone, jo struktūroje didėja suminis tuštumų tūris.

Siekiant detaliau įvertinti betono savybes, bendrasis poringumas buvo išskaidytas į atvirąjį poringumą, nuo kurio tiesiogiai priklauso vandens įgėrimas, ir uždarąjį poringumą, kuris yra palankus betono ilgaamžiškumui. Rezultatai pateikiami 17 lentelėje.

Visuose bandiniuose dominuoja atvirasis poringumas. Didžiausias skirtumas stebimas uždarojo poringumo rodikliuose. Betonai su 15 procentų stiklo atliekų, nepaisant didžiausio bendrojo

poringumo, pasižymi didžiausia uždary porų dalimi (6,7 %), lyginant su kontroliniu ir 10 procentų mišiniais (5,3 %). Didesnis uždarys poringumas betone su 15 procentų stiklo atliekų indikuoja geresnę struktūrinę izoliaciją, kuri trukdo kapiliarinei drėgmės migracijai.

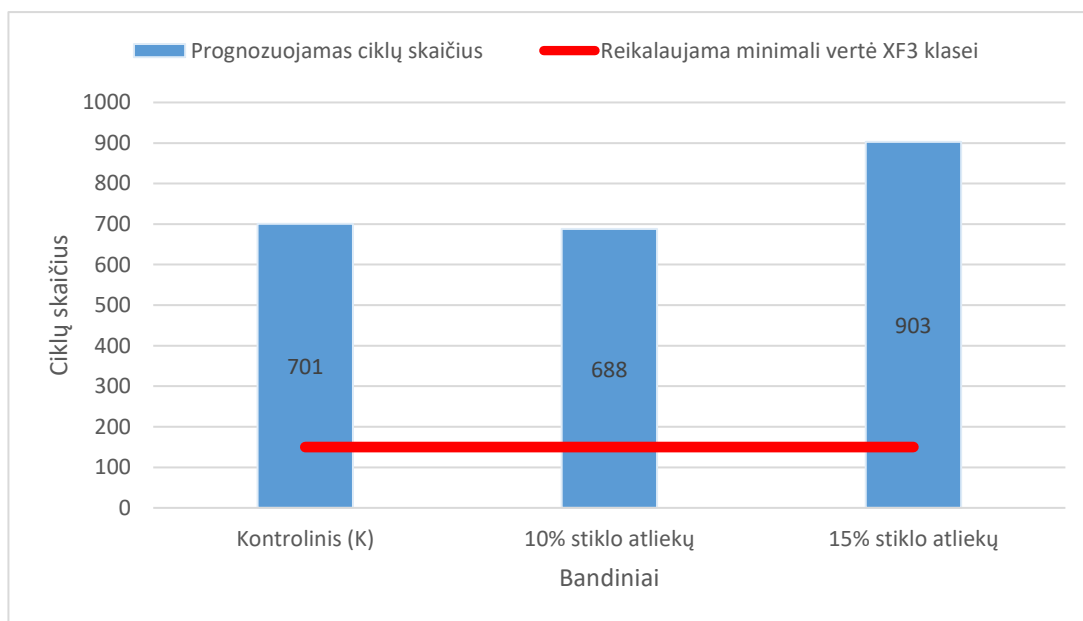
Remiantis vandens įgėrimo kinetika, buvo nustatyti struktūriniai rodikliai: porų dydžių vienodumo rodiklis α ir vidutinio porų dydžio rodiklis λ . Porų dydžių vienodumo rodiklis α aukščiausią reikšmę pasiekė serijoje 15 (0,8), kas rodo, kad šio betono porų dydžiai yra pasiskirstę tolygiausiai. Serijoje 10 nustatyta mažiausia reikšmė (0,6), rodanti nevienodą porų dydžių pasiskirstymą. Vidutinio porų dydžio rodiklis λ mažiausias buvo serijoje 15 (1,1), o tai koreliuoja su smulkesne porų struktūra, tuo tarpu serijoje 10 fiksuojama didžiausia reikšmė (1,5), indikuojanti stambesnes poras.

Remiantis nustatytais poringumo parametrais, apskaičiuotas atsparumo šalčiui kriterijus ir prognozuojamas šalčio ciklų skaičius, pateikiamas 18 lentelėje.

18 lentelė. Bandinių atsparumo šalčiui kriterijus ir prognozuojamas ciklų skaičius

Mišinio tipas	Atsparumo šalčiui kriterijus	Prognozuojamas ciklų skaičius
K	4,5	701
10	4,4	688
15	6,0	903

Rezultatai rodo tiesioginį ryšį tarp porų struktūros kokybės ir ilgaamžiškumo. Bandiniams su 15 % stiklo apskaičiuotas aukščiausias atsparumo šalčiui kriterijus 6,0 ir prognozuojamas atsparumas iki 903 ciklų. Kontrolinės ir 10 serijos atsparumo šalčiui rodiklis gana panašus – 4,5 ir 4,4, prognozuojami ciklai taip pat panašūs ~700.



19 pav. Prognozuojamas ciklų skaičius

Gauti rezultatai rodo, kad bandiniai su 15 % stiklo turi didžiausią bendrąjį poringumą, struktūra yra palankiausia ilgaamžiškumui dėl didelės uždary porų dalies, aukšto porų vienodumo rodiklio ir mažo

vidutinio porų dydžio. Tuo tarpu serija 10 ir kontrolinė, turinti stambesnes ir nevienodai pasiskirsčiusias poras, pasižymi mažiausiu prognozuojamu atsparumu šalčiui. Visi bandiniai tenkino XF3 betono klasei keliamus reikalavimus.

Atliktas oro kiekio šviežiame betone tyrimas, vadovaujantis LST EN 12350-7 [49] standartu, ir betono uždaro / atviro poringumo nustatymas, pagal GOST 12730.4-78 [52], parodė dvejopus rezultatus.

Nustatyta, kad maltos stiklo atliekos, pasižyminčios dideliu smulkumu, sukėlė neigiamą poveikį oro įtraukiančios įmaišos efektyvumui. Dėl to visų tirtų mišinių (K, 10 %, 15 %) oro kiekis šviežiame betone (1,9–2,7 %) neatitiko minimalaus 4,0 % reikalavimo, būtino XF3 poveikio klasei. Šis oro kiekio deficitas (ypač didžiausias 15 % stiklo atliekų serijoje) paprastai reikštų kritišką atsparumo šalčiui sumažėjimą ir greitąėjimą dėl užšalimo–atšilimo ciklų.

Nepaisant oro kiekio trūkumo šviežiame betone, poringumo tyrimai atskleidė, kad stiklo atliekos, ypač didesnė (15 %) dozė, suformavo palankią sukiėtėjusio betono porų struktūrą. Ši serija pasižymėjo didžiausiu uždaro porų tūriu (6,7 %), vienodesniu porų dydžių pasiskirstymu $\alpha = 0,8$ ir mažiausiu vidutiniu porų dydžiu $\lambda = 1,1$. Ši struktūra lėmė žymiai padidėjusį prognozuojamą atsparumą šalčiui – aukščiausias apskaičiuotas 903 ciklų atsparumo rodiklis.

Tyrimas patvirtino, kad nors stiklo atliekos neigiamai veikia oro burbuliukų stabilizavimą šviežiame betone, jos kompensuoja šį trūkumą, suformuodamos tankesnę, homogeniškesnę ir mažiau kapiliarinę struktūrą sukiėtėjusiame betone. Tai leidžia pasiekti aukščiausią ilgaamžiškumo lygį, gerokai viršijant minimalius XF3 klasės reikalavimus, remiantis struktūriniais kriterijais. Vis dėlto, tolimesniems taikymams būtina koreguoti oro įtraukiančios įmaišos dozavimą, siekiant užtikrinti atitiktį ir fiziniams, ir prognozuojamiems ilgaamžiškumo reikalavimams.

3.8. Kapiliarinio užšalimo/atšilimo tyrimo rezultatai

Šiame skyriuje analizuojami betono savybių pokyčiai po 28 užšalimo-atšilimo ciklų, veikiant 3 % natrio chlorido (NaCl) tirpalui. Vertinimas atliktas dviem aspektais: paviršiaus erozijos (masės nuostolis) ir struktūrinio atsparumo (gniuždomojo stiprio pokytis) nustatymu.

Masės nuostolis yra pagrindinis rodiklis, nurodantis paviršinės erozijos lygį, kurį sukelia ledo tirpymo druskos. Pradiniai ir galutiniai masės duomenys bei apskaičiuotas nuostolis pateikiami 19 lentelėje.

19 lentelė. Masės nuostoliai

Bandinio žymuo	Masė prieš ciklą (m_{pr}), g	Masė po ciklų (m_p), g	Masės pokytis (Δm), g	Masės nuostolis, %
K (Kontrolinis)	2366,9	2354,3	-12,6	0,53
10.1	2430,5	2378,9	-51,6	2,12
10.2	2380,6	2338,3	-42,3	1,78
15	2332,6	2327,7	-4,9	0,21

Didžiausias masės nuostolis (vidutiniškai 1,95 %) nustatytas 10 % EA mišiniuose (10.1 ir 10.2). Šis nuostolis yra beveik 4 kartus didesnis nei kontrolinio mišinio (0,53 %). Masės praradimas rodo šių mišinių pažeidžiamumą dėl druskos tirpalo poveikio užšalimo-atšilimo metu. Tai susiję su nepakankamu uždarytųjų porų kiekiu mišinyje.

Geriausi atsparumo testo rezultatai buvo 15 % EA mišinio, kurio masės nuostolis siekė tik 0,21 %. Toks minimalus masės praradimas rodo itin aukštą atsparumą paviršinei erozijai. Tikėtina, kad 15 % smulkiųjų elektroninių atliekų stiklo dalelių kiekis optimaliai užpildė poras ir suformavo papildomus pucolaninius produktus, kurie sandarino betono paviršinę zoną ir sumažino druskos tirpalo prasiskverbimą.



20 pav. Bandinių numeracija



21 pav. Bandiniai prieš tyrimą



22 pav. Bandiniai po tyrimo

Paviršius turėjęs kontaktą su druskos tirpalu tapo šiurkštus. Labiausiai paveikti buvo 10 % bandiniai, jų paviršius vizualiai šiurkštus ir grublėtas, matomi aiškūs pažeidimai. Kontrolinio ir 15 % bandinio paviršiai išliko gana lygus, matomi tik minimalūs pažeidimai.

Siekiant įvertinti vidinės betono struktūros pažeidimus, buvo atliktas gniuždomojo stiprio palyginimas prieš ir po 28 ciklų. Struktūrinis atsparumas šalčiui įvertintas šalčio atsparumo koeficientu K.

20 lentelė. Gniuždomojo stiprio nuostoliai

Bandinio žymuo	$f_{cm,pr}$ (pradinis stipris, MPa)	$f_{cm,n}$ (stipris po ciklų, MPa)	Koeficientas K	Stiprio praradimas, %
K	56,8	56,66	0,9975	0,25 %
10 % EA (Vid.)	61,3	52,90	0,8630	13,70 %
15 % EA	55,6	50,1	0,9011	9,89 %

Analizuojant gniuždomojo stiprio pokyčius, kontrolinis mišinys pasižymėjo itin dideliu atsparumu, prarado tik 0,25 % pradinio stiprio $K=0,9975$. 10 % stiklo mišinys prarado 13,70 % pradinio stiprio $K=0,8630$. 15 % stiklo mišinys prarado 9,89 % pradinio stiprio, pasiekdamas $K=0,9011$. Nors K koeficientas yra geresnis nei 10 % stiklo mišinio, jis vis dar rodo žymų stiprio sumažėjimą. Pagal gautus duomenis galima teigti, kad nors paviršius buvo puikiai apsaugotas nuo erozijos, vidinė betono struktūra patyrė žalos, kuri pasireiškė stiprio praradimu. Tai gali būti dėl specifinės porų struktūros, leidžiančios šalčiui veikti viduje be ženklios paviršinės erozijos.

Atlikus laboratorinius tyrimus galima apibendrinti, kad praktiniam naudojimui geriausia taikyti 10 % portlandcemenčio pakeitimo maltu EA stiklu santykį. Ši proporcija užtikrina optimalų balansą tarp betono takumo (SF1 klasė) ir mechaninio stiprio (C30/37 klasė). Didinant priedo kiekį iki 15 % būtina papildomai koreguoti cheminių įmaišų dozavimą, kad būtų išlaikyta savaime susitankinamam betonui reikalinga konsistencija.

Gamybos procese kritiškai svarbu užtikrinti žaliavos kokybę – stiklas turi būti sumaltas iki smulkesnių nei 50 μm dalelių ir visiškai išvalytas nuo plastiko priemaišų. Toks smulkumas garantuoja pucolanių aktyvumą, o švarumas – vientisą cementinio akmens struktūrą. Dėl nustatyto lėtesnio ir mažesnio hidratacijos šilumos išsiskyrimo, šį betoną tikslingiausia naudoti masyvioms konstrukcijoms (dvipusio betonavimo sienose, apjungiamojo rostverko ruožuose), siekiant išvengti plyšių ir neprognozuotų trūkumų.

Ilgalaikiam technologijos saugumui užtikrinti rekomenduojama atlikti papildomus šarminės silikos reakcijos (ASR) tyrimus, kurie patvirtintų betono stabilumą eksploatacijos metu. Taip pat reikalinga šį sprendimą deklaruoti kaip tvarią alternatyvą pastatų sertifikavimo procesuose, nes tai leidžia efektyviai mažinti statybų sektoriaus CO₂ pėdsaką ir skatina žiedinę ekonomiką, perdirdant sudėtingas elektronikos atliekas.

Išvados

1. Iš trijų tirtų malimo variantų nustatyta, kad optimaliausias yra smulkus malimas su maksimaliai eliminuotomis plastiko priemaisomis (III malimas). Šio stiklo miltelių tariamasis tankis buvo didžiausias (apie $1,99 \text{ t/m}^3$, palyginti su $\sim 1,97 \text{ t/m}^3$ I ir $\sim 1,78 \text{ t/m}^3$ II malimo atvejais). Tai rodo mažesnę lengvų priemaišų dalį ir labiau prognozuojamą žaliavos elgseną betono mišinyje. Todėl tolesniems tyrimams ir praktiniam taikymui tikslinga naudoti smulkiai sumaltą ir nuo plastiko priemaišų išvalytą EA stiklą.
2. Didėjant maltų EA stiklo kiekiui, naudojamam kaip dalinis cemento pakaitalas (nuo 0 iki 15 % rišiklio masės), mažėja cemento tešlos hidratacijos šiluma ir lėtėja reakcijos eiga: maksimali temperatūra sumažėjo nuo $32,5^\circ\text{C}$ kontroliniame bandinyje iki $26,0^\circ\text{C}$ bandinyje su 15 % stiklo, o hidratacijos pikas nusikėlė nuo ~ 950 iki ~ 1100 min. Tai rodo, kad maltas stiklas veikia kaip mažiau reaktyvi, pucolaninė medžiaga, sumažinanti klinkerio koncentraciją ir išskaidanti šilumos išsiskyrimą ilgesniam laikui. Tai naudinga mažinant ankstyvųjų terminio įtempimo įtrūkimų riziką masyviose konstrukcijose.
3. Naudoto smulkumo maltas EA stiklas, pakeisdamas dalį klinkerio, pakeitė cemento tešlos ir akmens savybių raidą: 7 parą mišinių su 10 ir 15 % stiklo gniuždomasis stipris buvo atitinkamai apie 15 % ir 30 % mažesnis nei kontrolinio betono, tačiau 28 parą mišinys su 10 % stiklo pasiekė didžiausią gniuždomąjį stiprį ($61,3 \text{ MPa}$), pralenkdamas kontrolinį mišinį ($56,8 \text{ MPa}$). Poringumo tyrimai parodė, kad didesnė (15 %) smulkių stiklo dalelių dalis betono akmenyje formuoja didesnę uždarojo poringumo kiekį (6,7 %), smulkesnę ir vienodesnę porų struktūrą, palankią šalčiui atspariai cemento akmens mikrostruktūrai.
4. Maltas EA stiklas nedaug veikia šviežio betono tankį (nuo 2350 kg/m^3 iki 2326 kg/m^3 su 15 % stiklo), tačiau mažina oro kiekį, kuris visuose mišiniuose buvo mažesnis nei 4,0 % ($2,7\text{--}1,9\%$), neatitinkant XF3 klasės reikalavimų. Po 28 dienų visi mišiniai viršijo C30/37 klasės kubinį stiprį (37 MPa). Mišinys su 15 % stiklo turėjo didžiausią atsparumą šalčiui (~ 903 ciklai), tačiau kapiliarinio užšalimo testai atskleidė gniuždomojo stiprio sumažėjimą visiems mišiniams, didžiausią – su 10 % stiklo (13,7 %). Optimalus mišinys buvo su 10 % stiklo, pasiekęs didžiausią gniuždomąjį stiprį ($61,3 \text{ MPa}$), apie 8 % didesnę nei kontrolinis betonas, ir išlaikė reikiamą stiprį po 28 šalčio–druskų ciklų.
5. EA stiklo kiekis rišiklyje reikšmingai veikia mišinio pasklidimą ir galimybę betoną priskirti savaime susitankinančio betono klasei. Kontrolinis mišinys pasiekė tik apatinę SF1 pasklidos ribą (pasklida 555 mm), tačiau neatitiko t_{50} reikalavimo ($5,33 \text{ s} > 5 \text{ s}$). Mišinys su 10 % maltų stiklo atliekų turėjo optimalius SSB parametrus: pasklida 617,5 mm ir $t_{50} = 4,81 \text{ s}$, visiškai atitinkant SF1 klasės reikalavimus. Mišinys su 15 % stiklo pasklidos požiūriu (495 mm) nebepateko į SSB intervalą ir dėl per didelės klampos buvo priskirtinas įprastiniam S4 betonui. Tyrime naudotoms cheminių priedų dozėms, tik 10 % EA stiklo turintis mišinys yra tinkamas naudoti kaip savaime susitankinantis betonas, o didesnis stiklo kiekis reikalautų koreguoti superplastiklio kiekį.

Literatūros sąrašas

1. ARIOĞLU AKAN, Mahmure Övül; DHAVALE, Dileep G. ir SARKIS, Joseph. Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. *Journal of Cleaner Production*, vol. 167 (2017), pp. 1195–1207. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617316815>..
2. ADESINA, Adeyemi. Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environmental Challenges*, vol. 1 (2020), pp. 100004. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010020300044>..
3. MANJUNATHA, M.; PREETHI, S.; Malingaraya; MOUNIKA, H. G.; NIVEDITHA, K. N. ir kt. Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement-based materials. *Materials Today: Proceedings*, vol. 47 (2021), pp. 3637–3644. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321003370>..
4. MARTÍNEZ-ROCAMORA, A.; SOLÍS-GUZMÁN, J. ir MARRERO, M. LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58 (2016), pp. 565–573. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115016263>..
5. COLANGELO, Francesco; FORCINA, Antonio; FARINA, Ilenia ir PETRILLO, Antonella. Life Cycle Assessment (LCA) of Different Kinds of Concrete Containing Waste for Sustainable Construction. *Buildings*, vol. 8 (2018), nr. 5.
6. VIEIRA, Darli Rodrigues; CALMON, João Luiz ir COELHO, Felipe Zanellato. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, vol. 124 (2016), pp. 656–666. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816312259>..
7. HANUN, Yunan; ALISJAHBANA, Sofia W.; MA'SOEM, Dadang M.; IKHSAN SETIAWAN, M. ir AHMAR, Ansari Saleh. Designing Cost Production of Concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1028 (2018), nr. 1, pp. 012063. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1028/1/012063>..
8. MA, Mingxue; TAM, Vivian WY; LE, Khoa N. ir OSEI-KYEI, Robert. Factors affecting the price of recycled concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, vol. 46 (2022), pp. 103743. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221016016>..
9. YUAN, Xuehong; WANG, Jianbo; SONG, Qingming ir XU, Zhenming. Integrated assessment of economic benefits and environmental impact in waste glass closed-loop recycling for promoting glass circularity. *Journal of Cleaner Production*, vol. 444 (2024), pp. 141155. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624006024>..
10. BRISTOGIANNI, Telesilla ir OIKONOMOPOULOU, Faidra. Glass up-casting: a review on the current challenges in glass recycling and a novel approach for recycling “as-is” glass waste into volumetric glass components. *Glass Structures & Engineering*, vol. 8 (2023), nr. 2, pp. 255–302. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00206-9>..
11. Heriyanto; PAHLEVANI, Farshid ir SAHAJWALLA, Veena. From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass. *Journal of Cleaner Production*, vol.

- 191 (2018), pp. 192–206. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618312502>..
12. GOWTHAM, R.; MANIKANDA PRABHU, S.; GOWTHAM, M. ir RAMASUBRAMANI, R. A Review On Utilization Of Waste Glass In Construction Field. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1130 (2021), nr. 1, pp. 012010. Prieiga per:
<https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1130/1/012010>..
13. AHMAD, Jawad; MARTÍNEZ GARCÍA, Rebeca; ALGARNI, Salem; DE PRADO GIL, Jesus; ALQAHTANI, Talal ir kt. Characteristics of Sustainable Concrete with Partial Substitutions of Glass Waste as a Binder Material. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 16 (2022).
14. ROBERT, Dilan; BAEZ, Edwin ir SETUNGE, Sujeeva. A new technology of transforming recycled glass waste to construction components. *Construction and Building Materials*, vol. 313 (2021), pp. 125539.
15. SIDDIKA, Ayesha; HAJIMOHAMMADI, Ailar; FERDOUS, Wahid ir SAHAJWALLA, Veena. Roles of Waste Glass and the Effect of Process Parameters on the Properties of Sustainable Cement and Geopolymer Concrete—A State-of-the-Art Review. *Polymers*, vol. 13 (2021), nr. 22.
16. KHAN, Md Nabi Newaz; SAHA, Ashish Kumer ir SARKER, Prabir Kumar. Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review. *Journal of Building Engineering*, vol. 28 (2020), pp. 101052.
17. BAIKERIKAR, Abhijeet; MUDALGI, Shadab ir RAM, V. Vinayaka. Utilization of waste glass powder and waste glass sand in the production of Eco-Friendly concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 377 (2023), pp. 131078.
18. QAIDI, Shaker; NAJM, Hadee Mohammed; ABED, Suhad M.; ÖZKILIÇ, Yasin Onuralp; AL DUGHAIISHI, Husam ir kt. Concrete containing waste glass as an environmentally friendly aggregate: A review on fresh and mechanical characteristics. *Materials*, vol. 15 (2022), nr. 18, pp. 6222.
19. HARRISON, Edward; BERENJIAN, Aydin ir SEIFAN, Mostafa. Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials. *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 4 (2020), pp. 100064. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666498420300569>..
20. SANTOS, S.; DA SILVA, P. R. ir DE BRITO, J. Self-compacting concrete with recycled aggregates – A literature review. *Journal of Building Engineering*, vol. 22 (2019), pp. 349–371. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710218305217>..
21. ROBERT, Dilan; BAEZ, Edwin ir SETUNGE, Sujeeva. A new technology of transforming recycled glass waste to construction components. *Construction and Building Materials*, vol. 313 (2021), pp. 125539. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821032773>..
22. KIM, Il Sun; CHOI, So Yeong ir YANG, Eun Ik. Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, vol. 184 (2018), pp. 269–277. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818316283>..

23. KAZMI, Danish; WILLIAMS, David J. ir SERATI, Mehdi. Waste glass in civil engineering applications—A review. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 17 (2020), nr. 2, pp. 529–554. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/ijac.13434>..
24. BISIKIRSKE, Danguole; BLUMBERGA, Dagnija; VASAREVICIUS, Saulius ir SKRIPKIUNAS, Gintautas. Multicriteria analysis of glass waste application. *Environ.Clim.Technol*, vol. 23 (2019), nr. 1, pp. 152–167.
25. PAUL, Deepa; BINDHU, K. R.; MATOS, Ana Mafalda ir DELGADO, João. Eco-friendly concrete with waste glass powder: A sustainable and circular solution. *Construction and Building Materials*, vol. 355 (2022), pp. 129217. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822028732>..
26. ALIABDO, Ali A.; ABD ELMOATY, Abd Elmoaty M. ir ABOSHAMA, Ahmed Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 124 (2016), pp. 866–877. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181631279X>..
27. AHMAD, Jawad ir ZHOU, Zhiguang. Development of high strength self compacting concrete with waste glass and waste marble. *Construction and Building Materials*, vol. 408 (2023), pp. 133760.
28. ZEYBEK, Özer; ÖZKILIÇ, Yasin O.; KARALAR, Memduh; ÇELİK, Ali İ; QAIDI, Shaker ir kt. Influence of Replacing Cement with Waste Glass on Mechanical Properties of Concrete. *Materials*, vol. 15 (2022), nr. 21.
29. ABBA, Sani. Self-Compacting Concrete – A Review. *International Journal of innovative Technology & Exploring Engineering*, vol. 6 (2017), pp. 1–7.
30. AHMAD, Jawad ir ZHOU, Zhiguang. Development of high strength self compacting concrete with waste glass and waste marble. *Construction and Building Materials*, vol. 408 (2023), pp. 133760. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823034785>..
31. ADHIKARY, Suman Kumar; ASHISH, Deepankar Kumar; SHARMA, Himanshu; PATEL, Jitendra; RUDŽIONIS, Žymantas ir kt. Lightweight self-compacting concrete: A review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, vol. 15 (2022), pp. 200107.
32. BEHNAM, V. ir SHAMI, N. Mix design of light-weight self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 4 (2016), pp. 1–14.
33. ASLANI, Farhad; HAMIDI, Fatemeh ir MA, Qilong. Fire performance of heavyweight self-compacting concrete and heavyweight high strength concrete. *Materials*, vol. 12 (2019), nr. 5, pp. 822.
34. ALI-BOUCETTA, Tahar; BEHIM, Mourad; CASSAGNABERE, Franck; MOURET, Michel; AYAT, Amira ir kt. Durability of self-compacting concrete containing waste bottle glass and granulated slag. *Construction and Building Materials*, vol. 270 (2021), pp. 121133. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820331378>..
35. HABIBI, Alireza ir GHOMASHI, Jian. Development of an optimum mix design method for self-compacting concrete based on experimental results. *Construction and Building Materials*, vol. 168 (2018), pp. 113–123.

36. ZHENG, Keren. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali–silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, vol. 67 (2016), pp. 30–38.
37. CAI, Yamei; XUAN, Dongxing ir POON, Chi Sun. Effects of nano-SiO₂ and glass powder on mitigating alkali-silica reaction of cement glass mortars. *Construction and Building Materials*, vol. 201 (2019), pp. 295–302.
38. LIU, Zhuo; SHI, Caijun; SHI, Qiantao; TAN, Xiao ir MENG, Weina. Recycling waste glass aggregate in concrete: Mitigation of alkali-silica reaction (ASR) by carbonation curing. *Journal of Cleaner Production*, vol. 370 (2022), pp. 133545.
39. AKINPELU, Mutiu A.; ODEYEMI, Samson O.; OLAFUSI, Oladipupo S. ir MUHAMMED, Fatimah Z. Evaluation of splitting tensile and compressive strength relationship of self-compacting concrete. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 31 (2019), nr. 1, pp. 19–25.
40. OMRANE, Mohammed; KENAI, Said; KADRI, El-Hadj ir AÏT-MOKHTAR, Abdelkarim. Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. *Journal of Cleaner Production*, vol. 165 (2017), pp. 415–430.
41. Sika Baltic SIA (Lietuva). *Sika® ViscoCrete® D-190 (33%)*. [2022. Prieiga per: <https://ltu.sika.com/lt/statyba/betono-technologijamaio/surenkamojo-betonotechnologija/sika-viscocrete-d-19033.html>. [žiūrėta 2025-10-20].
42. Sika Baltic SIA (Lietuva). *SikaControl® AER-200 P*. [2023. Prieiga per: <https://ltu.sika.com/lt/statyba/betono-technologijamaio/papildomos-mai-osirproduktai/sikacontrol-aer-200p.html>. [žiūrėta 2025-10-20].
43. Sika Baltic SIA (Lietuva). *Sika® Stabilizer-4 R*. [2020. Prieiga per: <https://ltu.sika.com/lt/statyba/betono-technologijamaio/papildomos-mai-osirproduktai/sika-stabilizer-4r.html>. [žiūrėta 2025-10-20].
44. *Betono Užpildai / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2008 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
45. Kauno technologijos universitetas. ir IVANAUSKAS, Ernestas. *Statybinių medžiagų laboratoriniai darbai : mokomoji knyga / Ernestas Ivanauskas ... [et al.] ; Kauno technologijos universitetas*. Kaunas i.e. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2011..
46. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 1 Dalis. Pavidalas, Matmenys Ir Kiti Bandinių Bei Liejimo Formų Reikalavimai / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2021 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2021.
47. *Betono Mišinio Bandymai. 6 Dalis. Tankis / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2019 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2022.
48. *Betono Mišinio Bandymai. 8 Dalis. Susitankinantis Betonai. Pasklidus Bandymas / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2019 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020.
49. *Betono Mišinio Bandymai. 7 Dalis. Oro Kiekis. Slėginiai Metodai / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2019 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020.

50. *Cemento Bandymų Metodai. 9 Dalis. Hidratacijos Šiluma. Pusiau Adiabatinis Metodas / Lietuvos Standartizacijos Departamentas. 2010 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2010.*
51. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 3 Dalis. Bandinių Gniuždymo Stipris / Lietuvos Standartizacijos Departamentas. 2019 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020.*
52. *GOST 12730.4-78. Concretes. Methods of Determination of Porosity Parameters. , 1980.*
Prieiga per: https://mosstroylab.ru/f/gost_127304-78_opredeleniye_pokazateley_prochnosti.pdf.
53. *Betonas. Bandymo Metodai. 19 Dalis. Atsparumo Šalčiui Nustatymas Vienpusiu Užšaldymu Ir Atšildymu / Lietuvos Standartizacijos Departamentas. 2016 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.*