



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Vandeniui laidžių pėsčiųjų takų panaudojant gysločio miltelius ilgaamžiškumo tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Judita Jankutė

Projekto autorė

Doc. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Vandeniui laidžių pėsčiųjų takų panaudojant gysločio miltelius ilgaamžiškumo tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Judita Jankutė

Projekto autorė

Doc. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

Doc. Vytautas Bocullo

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Judita Jankutė

Vandeniui laidžių pėsčiųjų takų panaudojant gysločio miltelius ilgaamžiškumo 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.

Judita Jankutė

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.):	
Vandeniui laidžių kelio dangų, panaudojant sintetinį ar natūralų rišiklį, ilgaamžiškumo tyrimai	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-35 (2025-12-01)	
(lietuvių k.): Vandeniui laidžių pėsčiųjų takų panaudojant gysločio miltelius ilgaamžiškumo tyrimai	
(anglų k.): Investigation of the Durability of Water-Permeable Pedestrian Pathways Using Ground Plantain Powder (Plantago major)	
Pradiniai duomenys darbui:	
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 kassavaitinis konsultacijų laikas, kuris įvedamas į AIS, nurodant studento vidinį vidko kodą):	
Antradieniais, 16:30 val.	

Vadovas:	doc. dr. Ernestas Ivanauskas
(indėlis 100 %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Konsultantas:	
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Socialinis partneris:	
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Judita Jankutė
	<i>vardas, pavardė</i>
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Jankutė, Judita. Vandeniui laidžių pėsčiųjų takų panaudojant gysločio miltelius ilgaamžiškumo 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: gysločio milteliai, komunaliniai pelenai, ilgaamžiškumas, tvarumas.

Kaunas, 2026. 61 p.

Santrauka

Šiuolaikinių miestų infrastruktūros plėtra skatina ieškoti tvarių, aplinkai draugiškų ir funkcionalių pėsčiųjų dangos sprendinių, kuriems keliami ne tik mechaninio stiprio, bet ir vandens pralaidumo, ilgaamžiškumo bei ekologinio poveikio reikalavimai. Atsižvelgiant į klimato kaitos nulemtą kritulių kiekio didėjimą ir žiedinės ekonomikos principus parenkant medžiagas, tampa aktualu plėtoti vandeniui laidžias dangas, galinčias mažinti paviršinių nuotekų apkrovas ir gerinti miesto ekosistemų funkcionavimą. Dėl šios priežasties pasirenkama magistro baigiamojo projekto tema, kurios tikslas yra pagaminti vandeniui laidžią pėsčiųjų tako dangą panaudojant gysločio miltelius ir ištirti dangos ilgaamžiškumo gerinimo savybes bei galimus eksploatavimo scenarijus.

Baigiamojo magistro projekto tikslui pasiekti atliekami šie magistro baigiamojo projekto uždaviniai:

1. atlikus literatūros analizę apie vandeniui laidžias dangas bei biokompozito su gysločio milteliais gamybos technologiją, pasirinkti gamybos būdą ir suprojektuoti kompozito sudėtį;
2. ištirti gysločio miltelių ir cemento chemines savybes bei jas palyginti;
3. nustatyti pagaminto kompozito fizikines ir mechanines savybes;
4. įvertinti gysločio miltelių, komunalinių pelenų ir emulsijos įtaką kompozito struktūrai ir dangos ilgaamžiškumui, palyginti su kontroliniais bandiniais, pateikti eksploatavimo rekomendacijas.

Baigiamąjį magistro projektą sudaro trys dalys: teorinė dalis, kurioje nagrinėjama mokslinė literatūra, metodologinis skyrius ir tyrimų rezultatų bei jų diskusijų skyrius. Literatūros analizės dalyje pateikiami gysločio miltelių ir jų suderinamumo su komunaliniais pelenais poveikio kompozito savybėms trūkumai, pėsčiųjų dangų tipai, galimi fiziniai sprendimo būdai bei apžvelgtas organinių užpildų ar rišiklių efektas kompozitams. Tyrimų metodologijos dalyje pateikiamos tyrimui naudotos medžiagos, bandinių sudėtys, tyrimai ir tyrimų eiga. Tyrimų rezultatų dalyje pateikiami tyrimų rezultatai, nustatyta gysločio cheminė sudėtis, aprašomos biokompozito bandinių su gysločio milteliais fizikinės ir mechaninės savybės, pateikiami pėsčiųjų tako dangos eksploatavimo variantai ir rekomendacijos. Atlikus tyrimus nustatyta, kad mechanškai stipriausias bandinys yra B20+. Tačiau baigiamajame magistro projekte vertinama vandeniui laidži danga, todėl įvertinus visus ilgaamžiškumo tyrimus tinkamiausios sudėties yra biokompozitas su 10 % komunalinių pelenų (B10) kiekiu.

Magistro baigiamojo projekto apimtis siekia 61 p. be priedų, jame pateikta 16 lentelių ir 47 paveikslai. Darbe remtasi 55 literatūros šaltiniais.

Jankutė, Judita. Investigation of the Durability of Water-Permeable Pedestrian Pathways Using Ground Plantain Powder (*Plantago major*). 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: plantain powder, municipal waste ash, durability, sustainability.

Kaunas, 2026. 61 p.

Summary

The development of modern urban infrastructure necessitates the search for sustainable, environmentally friendly, and functional pedestrian pavement solutions that meet not only mechanical strength requirements but also criteria related to water permeability, durability, and ecological impact. Considering the increasing precipitation caused by climate change and the principles of the circular economy in material selection, the advancement of permeable pavements capable of reducing stormwater loads and improving urban ecosystem performance has become particularly relevant. For this reason, the chosen topic of the Master's thesis focuses on producing a water-permeable pedestrian pavement using plantain powder and investigating the properties that enhance pavement durability, as well as potential operational scenarios.

To achieve the aim of the Master's thesis, the following tasks were undertaken:

1. Based on a literature review of permeable pavements and the production technology of biocomposites with plantain powder, select a manufacturing method and design the composite composition.
2. Examine the chemical properties of plantain powder and cement, compare them.
3. Determine the physical and mechanical properties of the produced composite.
4. Evaluate the influence of plantain powder, municipal waste ash, emulsions on the composite structure and pavement durability in comparison with control samples and provide recommendations for practical application.

The thesis consists of three main parts: a theoretical section, a methodological section, and a section presenting research results and their discussion. The literature review outlines the limitations associated with plantain powder and its compatibility with municipal waste ash in composite formulations, describes various types of pedestrian pavements, identifies physical solutions, and examines the effects of organic fillers or binders on composite performance. The methodology section details the materials used, sample compositions, testing procedures, and experimental workflow. The results section presents the findings, including the chemical composition of plantain powder, the physical and mechanical properties of biocomposite samples containing plantain powder, as well as proposed operational scenarios and recommendations for pedestrian pavement applications. The research revealed that the mechanically strongest sample is B20+. However, given that the thesis evaluates water-permeable pavement, an overall assessment of durability tests indicated that the most suitable composition is the biocomposite containing 10% municipal ash (B10).

The Master's thesis comprises 61 pages (excluding appendices) and includes 16 tables and 47 figures. A total of 55 literature sources were referenced.

Turinys

Lentelių sąrašas	11
Paveikslų sąrašas	12
Santrumpos:	14
Įvadas.....	15
1. Literatūros analizė	16
1.1. Betonas ir betono gamybos poveikis aplinkai	16
1.2. Betonas su sintetiniais užpildais	16
1.3. Betonas su natūraliais užpildais.....	17
1.4. Komunalinių pelenų panaudojimas betone	17
1.5. Emulsijos, skirtos nepralaidžiam betonui, naudojimas	18
1.6. Projektuojamos kelio dangos ir joms keliami reikalavimai	19
1.7. Betonas, naudojamas dviračių ir pėsčiųjų takams	21
1.8. Organinės medžiagos, naudojamos kelių betone.....	22
1.9. Gyslotis ir gysločio milteliai	23
1.10. Betono ilgaamžiškumo tyrimai.....	24
1.11. Betono vandens pralaidumo tyrimas	26
1.12. Literatūros apžvalgos išvados.....	27
2. Tyrimų metodologija.....	28
2.1. Tyrime naudotos medžiagos.....	28
2.1.1. Gysločio milteliai	28
2.1.2. Komunaliniai pelenai.....	28
2.1.3. Emulsija SikaControl® E-150.....	29
2.1.4. 0/2 frakcijos granito atsijos	29
2.1.5. 2/5 frakcijos granito atsijos	29
2.1.6. Vanduo	29
2.2. Tyrimo metodai	29
2.2.1. 2/5 frakcijos granito atsijų padengimas su SikaControl® E-150 emulsija.....	29
2.2.2. Mišinių sudėtys.....	29
2.2.3. Mišinio maišymas ir bandinių formavimas	30
2.2.4. Cheminių cemento ir gysločio miltelių sudėčių nustatymas	30
2.2.5. Gysločio miltelių dalelių dydžio nustatymas Bleino prietaisu	31
2.2.6. Bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas	33
2.2.7. Mechaninio gysločio miltelių sumaišytų su vandeniu atsparumo testas	33
2.2.8. Vandens pralaidumo bandymas.....	34
2.2.9. Laikomosios gebos Kalifornijos rodiklio nustatymas	36
2.2.10. Atsparumo UV spinduliuotės poveikiui nustatymas	36
2.2.11. Medžiagų šalčiui atsparumo tyrimas	37
2.2.12. Gysločio miltelių, komunalinių pelenų hidratacijos tyrimas pusiau adiabatiniu kalorimetrijos metodu ³⁸	
3. Tyrimų rezultatai ir diskusija	39
3.1. 2/5 frakcijos granito atsijų padengimo su <i>SikaControl® E-150</i> emulsija rezultatai	39
3.2. Mišinių sudėčių rezultatai.....	39
3.3. Bandinių maišymo ir formavimo rezultatai.....	40

3.4.	Cheminių cemento ir gysločio miltelių sudėčių nustatymo rezultatai.....	41
3.5.	Gysločio miltelių dalelių dydžio nustatymo Bleino prietaisu rezultatai	43
3.6.	Bandinių gniuždymo stiprio rezultatai	44
3.7.	Mechaninio gysločio miltelių sumaišytų su vandeniu atsparumo testo rezultatai	45
3.8.	Vandens pralaidumo bandymo rezultatai	45
3.9.	Laikomosios gebos Kalifornijos rodiklio nustatymo rezultatai.....	48
3.10.	Atsparumo UV spinduliuotės poveikiui nustatymo rezultatai.....	49
3.11.	Medžiagų šalčio atsparumo tyrimo rezultatai.....	50
3.12.	Gysločio miltelių ir komunalinių pelenų hidratacijos tyrimo pusiau adiabatinio kalorimetrijos metodo rezultatai	53
	Išvados.....	56
	Literatūros sąrašas	57
	Priedai.....	62
1	Priedas. Kubelių tankio ir gniuždymo stiprio apskaičiavimas	62
2	Priedas. Bandinių vandens debito ir vertikalaus vandens pralaidumo nustatymas	64
3	Priedas. Bandinių vandens įgėrio apskaičiavimas.....	65
4	Priedas. Bandinių CBR rodiklio apskaičiavimas.....	66

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Rekomenduojamos dangų konstrukcijų klasės pagal gatvių kategorijas pagal STR 2.06.04:2014 15 lentelę [34].....	20
2 lentelė. Pėsčiųjų ir dviračių takų dangų konstrukcijos ant F2 ir F3 klasės gruntų pagal 13 lentelę [35]	20
3 lentelė. Betono mišinių gniuždomieji stipriai ir chlorido jonų įsiskverbimas [33].....	25
4 lentelė. Gamintojo deklaruojamos produkto <i>SikaControl® E-150</i> savybės [43]	29
5 lentelė. Biokompozito mišinių sudėtys prizmių formoms	39
5 lentelės tęsinys.	40
6 lentelė. Biokompozito mišinių sudėtys cilindro formoms	40
7 lentelė. Biokompozito mišinių sudėtys cilindro formoms CBR tyrimui.....	40
8 lentelė. Gysločio miltelių cheminė sudėtis.....	42
9 lentelė. Cemento miltelių cheminė sudėtis.....	42
10 lentelė. Gysločio miltelių ir vandens mišinio bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas	45
11 lentelė. Vandens debito ir vertikalios vandens pralaidumo nustatymas.....	46
12 lentelė. Pakartotinis vandens debito ir vertikalios vandens pralaidumo nustatymas.....	47
13 lentelė. CBR apskaičiavimas.....	48
14 lentelė. Atsparumo šalčiui tyrimo rezultatai	51
15 lentelė. Atliktų tyrimų analizė.....	54

Paveikslų sąrašas

1 pav. Vidutinės betono mėginių, kuriuose yra pelenų, gniuždymo stiprio vertės	18
2 pav. Porėto betono struktūra aplikavus emulsiją	19
3 pav. Laiko intervalas, vaizduojantis vandens lašo nuslydimą nuo hidroizoliacinio sluoksnio [18]	19
4 pav. Pagrindinės medžiagos, naudojamos perdirbtiems pluoštams gaminti [2]	21
5 pav. Gysločio gleivės absorbcija vandeniui	24
6 pav. Chlorido jonų įsiskverbimas ir sumaltų POFA pelenų panaudojimas betone esant V/R santykiams 0,40 ir 0,50 [33]	25
7 pav. Vandens pralaidumo bandymų rezultatai SCC mišiniuose, kuriuose panaudotas skirtingas BLA kiekis.....	26
8 pav. BLAC mišinių vandens pralaidumo tyrimų rezultatai	27
9 pav. Prasijoti komunaliniai pelenai	28
10 pav. Bandiniai CBR tyrimui.....	30
11 pav. SEM: Skenuojantis elektroninis mikroskopas – <i>FEI Quanta 200 FEG</i> [45]	31
12 pav. Bleino prietaisas	32
13 pav. Procentinė mišinio sudėtis.....	34
14 pav. Vertikalaus vandens pralaidumo nustatymo prietaisas	34
15 pav. Cilindrinų bandinių paruošimas vandens pralaidumo bandymui.....	35
16 pav. Prietaisas CBR nustatyti.....	36
17 pav. Bandinių laikymas UV spintoje	37
18 pav. Bandinių mirkymas vandenyje.....	37
19 pav. Pusiau adiabatinio kalorimetro tyrimas.....	38
20 pav. 2/5 fr. granito atsijos padengtos <i>SikaControl® E-150</i> emulsija.....	39
21 pav. Piršto įspaudimo testas	41
22 pav. SEM nuotraukos: a) cemento dalelės $\times 200$ b) gysločio miltelių dalelės $\times 200$	42
23 pav. Gysločio miltelių cheminių elementų pasiskirstymo intensyvumo kreivės	43
24 pav. Bandinių tankio nustatymo rezultatai.....	44
25 pav. Bandinių gniuždymo stiprio rezultatai	44
26 pav. Gyslotis + vanduo mišinio bandinys po sugniuždymo.....	45
27 pav. Vizualinė bandinių analizė po vandens pralaidumo bandymo	46
28 pav. Koreliacija tarp dviejų vandens pralaidumo bandymų.....	47
29 pav. Vandens įgėrimo kiekis	48
30 pav. B0, B10 ir B20+ bandinio įsiskverbimo gylio ir jėgos priklausomybė.....	49
31 pav. Bandiniai prieš atsparumo UV spinduliuotei tyrimą: sudėtis B0, B0+, B10, B20.....	50
32 pav. Bandiniai po atsparumo UV spinduliuotei tyrimo (10 parų): sudėtis B0, B0+, B10, B20 ..	50
33 pav. Bandiniai prieš atsparumo UV spinduliuotei tyrimą: sudėtis B30, B10+, B20+, B30+	50
34 pav. Bandiniai po atsparumo UV spinduliuotei tyrimo (10 parų): sudėtis B30, B10+, B20+, B30+	50
35 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B0	51
36 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B0+	51
37 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B10	52
38 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B20	52
39 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B30	52
40 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B10+	52

41 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B20+	52
42 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B30+	53
43 pav. Bandiniai po atsparumo šalčiui tyrimo.....	53
44 pav. Bandiniai po atsparumo šalčiui tyrimo.....	53
45 pav. Pusiaus adiabatinio kalorimetrijos metodo rezultatai	54

Santrumpos:

AŠAS – apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis;

LCA – gyvavimo ciklo analizė;

PCP – pralaidi vandeniui betoninė danga;

RAC – perdirbto užpildo betonas;

SPS – skaldos pagrindo sluoksnis;

ŠNS – šalčiui nejautrių medžiagų sluoksnis;

V/C – vandens ir cemento santykis betone;

V/R – vandens ir rišiklio santykis betone;

ŽPS – žvyro pagrindo sluoksnis.

Įvadas

Didėjant statybinių medžiagų paklausai, medžiagų trūkumui ir augančiam susirūpinimui dėl aplinkos, visame pasaulyje vis aktyviau diskutuojama apie efektyvų išteklių naudojimą statybose [1]. Pastaraisiais metais ši tema tapo ypač aktuali, nes įvairiuose lygmenyse – vyriausybėse, pramonėje ir akademinėje bendruomenėje – pradėta plačiau naudoti žiedinės ekonomikos koncepciją [1]. Betonas yra viena pagrindinių kompozitinių medžiagų statybų sektoriuje, todėl strategijų, skirtų jo žalingam poveikiui aplinkai mažinti, nustatymas yra itin svarbus [2]. Siekiama atrasti medžiagą ar kompozitą, kuris savo savybėmis pasižymėtų reikiamu stiprumu ir būtų draugiškas aplinkai.

Dėl šios priežasties darbe analizuojamas gysločio miltelių panaudojimas kaip alternatyva tradiciniam cementui, siekiant sumažinti anglies dioksido emisijas, susidarančias per cemento gamybą. Gysločio milteliai vertinami kaip potencialus natūralios kilmės rišiklio komponentas, galintis iš dalies pakeisti cemento kiekį betono mišinyje ir taip prisidėti prie aplinkosauginių tikslų įgyvendinimo. Tuo pačiu didelis dėmesys skiriamas komunalinių atliekų pelenų taikymui, kurie, kaip antrinis pramonės produktas, gali būti pakartotinai panaudojami kompozite. Kadangi šių komponentų derinys literatūroje nagrinėjamas ribotai, jų integravimas į pėsčiųjų takų dangų kompozitus gali suteikti naujų įžvalgų apie alternatyvių, mažesnį poveikį aplinkai turinčių medžiagų kūrimo galimybes ir prisidėti prie jų eksploatacinių savybių optimizavimo statybos inžinerijoje.

Darbo tikslas – pagaminti vandeniui laidžią pėsčiųjų tako dangą panaudojant gysločio miltelius ir ištirti dangos ilgaamžiškumo gerinimo savybes ir galimus eksploatavimo scenarijus.

Darbo uždaviniai:

1. atlikus literatūros analizę apie vandeniui laidžias dangas bei biokompozito su gysločio milteliais gamybos technologiją, pasirinkti gamybos būdą ir suprojektuoti kompozito sudėtį;
2. ištirti gysločio miltelių ir cemento chemines savybes ir jas palyginti;
3. nustatyti pagaminto kompozito fizikines ir mechanines savybes;
4. įvertinti gysločio miltelių, komunalinių pelenų ir emulsijos įtaką kompozito struktūrai ir dangos ilgaamžiškumui, palyginti su kontroliniais bandiniais, pateikti eksploatavimo rekomendacijas.

1. Literatūros analizė

1.1. Betonas ir betono gamybos poveikis aplinkai

Šiuolaikinėje statybų pramonėje tvarumas yra vienas iš esminių veiksnių, lemiančių technologinius, ekonominius, aplinkosauginius ir kt. procesus [2]. Atsirandant didesnei statybinių medžiagų paklausai ir mažėjant išteklių prieinamumui, efektyvus išteklių naudojimas statybose tampa plačiai diskutuojama tema visame pasaulyje [1]. Siekiama atrasti medžiagą ar kompozitą, kuris savo savybėmis pasižymėtu reikiamu stiprumu ir būtų draugiškas aplinkai. Įprasto betono ilgaamžiškumą gali neigiamai paveikti aplinkos veiksniai, cheminiai ir fiziniai pažeidimai bei ilgalaikės apkrovos, dėl ko reikšmingai sumažėja konstrukcijų tarnavimo laikas ar išauga jų remonto kaštai [3]. Taip pat, plataus masto betono naudojimas gali prisidėti prie CO₂ emisijų didėjimo, neatsinaujinančių išteklių senkamumo ir didesnių energijos sąnaudų, o tai kelia rimtų iššūkių aplinkos išsaugojimui [3]. Šios aplinkybės pabrėžia būtinybę kurti tvarų betoną, kuriam reikėtų mažiau neatsinaujinančių išteklių, jis suvartotų mažiau energijos, išskirtų mažiau CO₂ emisijų ir galėtų savarankiškai įvertinti savo būklę, taip leidžiant laiku imtis reikiamų korekcinų veiksmų [3].

Betonas iš savęs itin gerai atlaiko gniuždomąjį stiprį. Santykinė drėgmė ir vandens kiekis yra itin svarbūs parametrai, darantys įtaką betono gniuždomojo stiprio rezultatams [4]. Nustatyta, kad tankio, vandens kiekio, ultragarso impulsų sklidimo greičio ir šmidto plaktuko duomenų naudojimas yra pagrįstas gniuždomojo stiprio prognozavimui [4]. Nepaisant teigiamų savybių, kaip gniuždomasis stipris, ilgaamžiškumas ir kt., betonas taip pat turi ir neigiamų savybių aplinkai. Svarbiausioji – CO₂ išsiskyrimas betono gamybos metu. Klinkeris yra pagrindinė sudedamoji betono medžiaga, atsakinga dėl 45 % CO₂ išsiskyrimo [5]. Mokslinėje literatūroje pateikiama keletas būdų, kaip galima sumažinti anglies dioksido emisijas, pakeičiant šią medžiagą pelenais [5], spausdinant betoną 3D spausdintuvu [6] ir t.t. Toliau tyrinėjami skirtingo betono kompozitai dėl tvarios ir gana stiprios sudėties radimo.

1.2. Betonas su sintetiniais užpildais

Betonas su sintetiniais užpildais yra moderni statybinė medžiaga. Enrique del Rey Castillo ir kt. [7] tyrinėjo dirbtinio užpildo, pagaminto iš plastiko atliekų, inkorporavimą kuriant lengvąjį betoną. Tyrimo metu sukurti 5 mišiniai su vis didesniu dirbtinio užpildo kiekiu. Ištirta, kad didėjant dirbtinio užpildo kiekiui betone, mažėja betono tankis ir nuosėdos [7]. Todėl tolimesniems rezultatams parenkamas optimaliausias bandinys, pakeičiant 15 % natūralaus užpildo pagal svorį. Atliktas tyrimas parodė, kad sintetiniai užpildai, pagaminti atliekant plastiko atliekų ekstrudavimo ir granuliavimo procesus, gali būti naudojami lengvo betono (1800 kg/m³) gavybai, nes turi efektyvias gniuždomojo stiprumo savybes (20 MPa po 28 dienų) [7]. Dirbtiniai užpildai gaminami leidžiant miltelinėms medžiagoms sušlapti. Granuliavimo metu drėgnos dalelės sąveikauja veikiant sukibimo ir maišymo jėgoms [8]. Granuliavimo metodas yra patrauklus mokslininkams, nes jis gali sumažinti natūralių užpildų poreikį. Tačiau šviežiai suformuoti užpildai gali neturėti pakankamo stiprumo, todėl jų kietinimui taikomas sukepinimas [8]. Sintetiniai užpildai turi daugiau neigiamų savybių. Dažnai naudojamas dirbtinis užpildas stiklas ar metalas gali lemti sukietėjusio betono savybes ilgalaikėje perspektyvoje. Dirbtinių užpildų naudojimas lemia didesnę džiūvimo susitraukimą, plieno šlakas gali sukelti betonui plėtimosi problemas, stiklo atliekos gali sukelti alkalio-silikato reakciją [9]. Taip pat, sintetinių užpildų gamybos išlaidos yra didesnės palyginti su natūralių užpildų gamyba, tam reikalinga specializuota įranga ir kvalifikuoti darbuotojai [8]. Išsiaiškinus sintetinių užpildų betono kompozito teigiamas ir neigiamas savybes, toliau tiriamas betonas su natūralios kilmės užpildais.

1.3. Betonas su natūraliais užpildais

Paprastai betonas gaminamas iš smėlio, žvyro ar kalkakmenio. Tai natūralūs gamtoje randami rišikliai. Kalkakmenio naudojimas statybos pramonėje vis didėja dėl jo, kaip užpildo, privalumų, tokių kaip didelis stiprumas, maža alkalių-silikato reakcija bei sumažėjusi džiūvimo, susitraukimo tendencija betone [5]. Tyrimas nagrinėja kalkakmenio naudojimą ir bendrąsias savybes JAV bei Japonijoje. Tyrimo metu atlikti eksperimentai su įvairių proporcijų smulkaus kalkakmenio ir smėlio mišiniais, naudojant skirtingus vandens/cemento (V/C) santykius. Pasirinkti V/C santykiai buvo 45 %, 55 % ir 65 %, su smulkaus kalkakmenio pakaitalu 0 %, 30 %, 50 % ir 100 %. Siekiant nustatyti ryšį su vandeniu, buvo matuojamas džiūvimas ir susitraukimas bei vandens absorbcija ir poringumas, kai vanduo užsidaro uolienu paviršiaus porose. Rezultatai rodo, kad didėjant smulkaus kalkakmenio proporcijai mišinyje, padidėja suspaudimo ir lenkimo stiprumas bei elastingumo modulis. Išskirtiniai rezultatai gauti džiūvimo-susitraukimo atveju, kuris gerokai sumažėjo didėjant smulkaus kalkakmenio proporcijoms [5]. Kalkakmenio ir kitų natūralių betono užpildų gaminimas kelia spartų gamtinių išteklių mažėjimą. Be to, apie 7 % visos pasaulinės energijos sunaudojama žaliavų, naudojamų betonui paruošti, išgavimui, apdorojimui ir tvarkymui [10]. Betono pramonės priklausomybė nuo neatsinaujinančių išteklių galėtų būti sumažinta, jei betono apdorojimo ir tvarkymo atliekos būtų naudojamas kaip naujų žaliavų šaltinis betono gamybai [10]. Apie 25–35 % šių atliekų sudaro betono atliekos, kuris yra smulkinamas, kad būtų paruoštas perdirbtas užpildas. Šis betonas yra žinomas kaip perdirbtų užpildų betonas (RAC) [10]. Tvarus statybos pramonės augimas gali būti užtikrintas sumažinant natūralių užpildų naudojimą. Be to, betone reikia optimizuoti cemento kiekį, nes cemento gamyba sudaro apie 8 % pasaulinio CO₂ išmetimo [10]. Dėl šios priežasties baigiamajame magistro projekte bus siekiama keisti cementą naudojant gysločio miltelius.

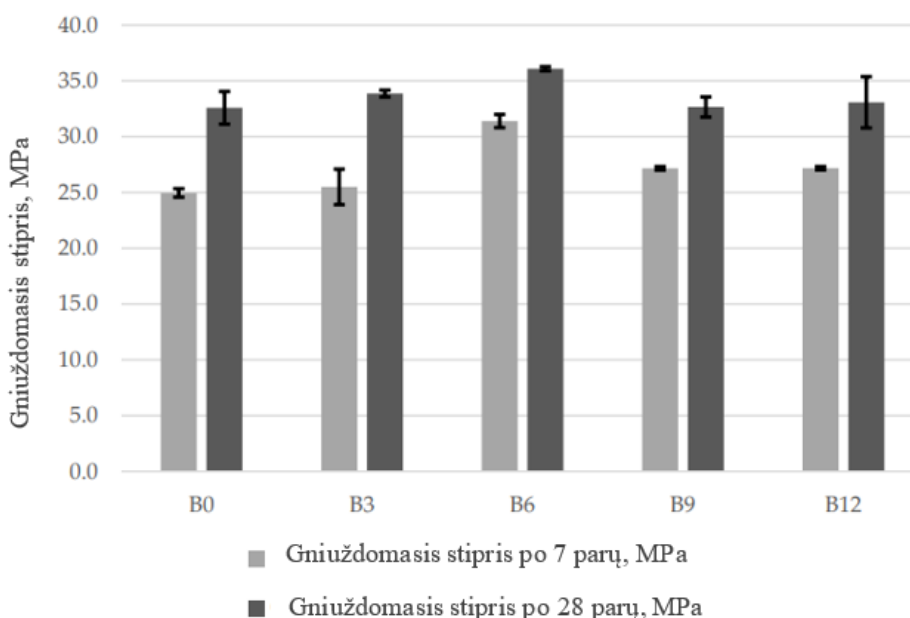
1.4. Komunalinių pelenų panaudojimas betone

Žiedinės ekonomikos principas siekia mažinti atliekų kiekį, jas perdirbant pramonės procesuose. Viena iš šio tikslo įgyvendinimo krypčių – komunalinių atliekų pelenų panaudojimas cemento pagrindo medžiagose. Tai leidžia tausoti gamtos išteklius ir mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas, kurios cemento pramonėje sudaro apie 8 % pasaulinių CO₂ išmetimų [11]. Atliekų pelenų naudojimas mažina cemento poreikį betone ir prisideda prie tvaresnės statybos. Tyrėjai [12] išnagrinėjo galimybę visiškai pakeisti natūralų smėlį (0/2 mm frakcijos) komunalinių kietųjų atliekų pelenais skiedinio sudėtyje. Jie ištyrė pelenų fizines ir chemines savybes. Gauti rezultatai parodė, kad cemento skiedinių, kuriuose naudoti pelenai, gniuždymo stipris siekė nuo 19,4 MPa (be superplastifikatoriaus) iki 33,3 MPa (pridėjus 3 % superplastifikatoriaus) [12].

Tyrimo [13] analizuota, kaip skirtingi smėlio pakeitimo pelenais kiekiai (0 %, 20 %, 30 %) veikia cemento mišinių savybes. Pastebėta, kad pelenų įmaišymas pagerino ankstyvąjį, po trijų parų matuojamą, skiedinio gniuždymo stiprį. Optimalūs rezultatai buvo pasiekti, kai smėlio dalis buvo pakeista 10–20 % pelenų [13]. Dugno pelenai daugiausia sudaryti iš silicio, kalcio, aliuminio ir geležies junginių. Dėl aliuminio reakcijos su vandeniu susidaro aliuminio hidroksidas ir išsiskiria vandenilis, kuris padidina betono poringumą [14].

M. Vaičienės ir E. Simanavičiaus tyrime [11] tyrinėtas komunalinių atliekų įtraukimas į cementinio skiedinio bandinius, dalį smėlio pakeičiant pelenais. Šiame tyrime betono mėginių gniuždymo stipris nustatytas po 7 ir 28 parų kietėjimo. Vidutinės gautos stiprio reikšmės pateiktos 1 paveiksle (žr. 1 pav.). Po 28 parų nustatyta, kad kontrolinių betono mėginių vidutinis gniuždymo stipris siekė 32,6

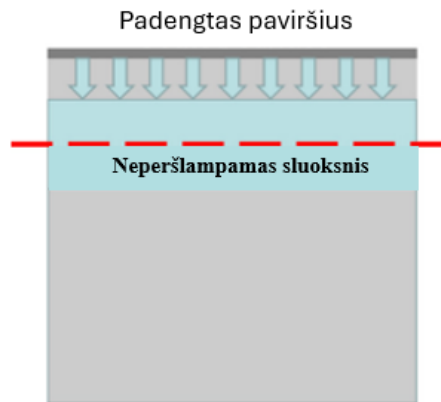
MPa. Kai dalis cemento buvo pakeista atliekų pelenais, stipris svyravo nuo 32,6 iki 36,1 MPa. Didžiausias – 36,1 MPa – užfiksuotas mėginiuose su 6 % pelenų. Tai sudaro apie 10,7 % stiprio padidėjimą, palyginti su kontroliniais mėginiais. Šį pagerėjimą galima sieti su tankesne betono struktūra, susidarančia dėl cemento hidratacijos produktų. Vis dėlto didesnis pelenų kiekis (9–12 %) sumažino stiprį maždaug 9 %, nes sumažėja kalcio aluminatų kiekis, o didelis pelenų poringumas ir aliuminio reakcijos gali silpninti betoną [11].



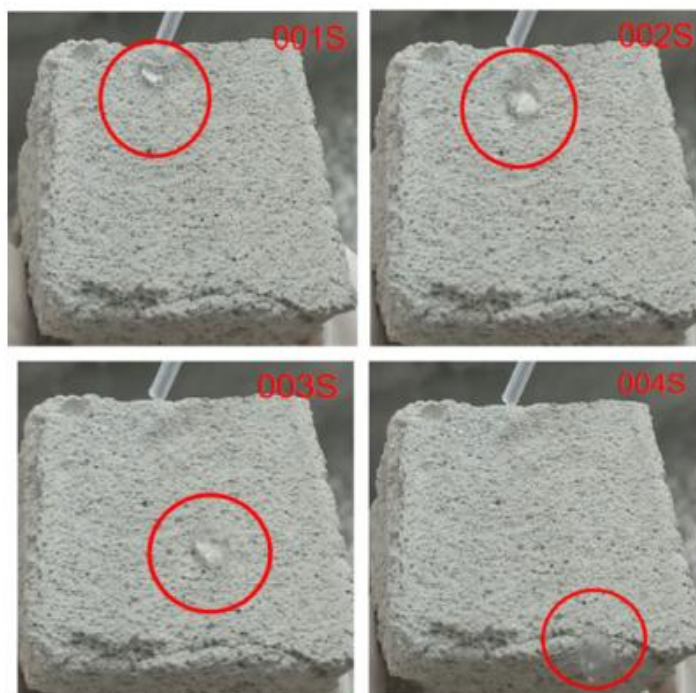
1 pav. Vidutinės betono mėginių, kuriuose yra pelenų, gniuždymo stiprio vertės

1.5. Emulsijos, skirtos nepralaidžiam betonui, naudojimas

Porėtas betonas pasižymi keliomis naudingomis savybėmis: mažu tankiu, gera šilumos izoliacija, garso slopinimu ir suderinamumu su daugeliu statybinių medžiagų. Vis dėlto jo gamybos procesas lemia porėtos struktūros susidarymą, kas didina vandens įgėrį ir gali sukelti konstrukcinius trūkumus [15]. Jing Gao ir kt. [15] tyrime naudota silano pagrindo emulsija ženkliai sumažino porėto betono mėginių kapiliarinį vandens įgertį [15]. Esant 20 °C temperatūrai, silano emulsija parodė pagerintą hidroizoliacinį efektą, sudarydama su porėtu betonu storą vandeniui atsparų sluoksnį [15]. Porėto betono atsparumą vandeniui galima pagerinti dviem būdais: taikant paviršinės hidroizoliacijos arba vidinės hidroizoliacijos metodą [16, 17]. Paviršinės hidroizoliacijos metodas apima hidroizoliacinės medžiagos padengimą ant porėto betono paviršiaus. Medžiaga užpildo paviršiaus poras arba dėl kapiliarinio poveikio įsiskverbia iki tam tikro gylio bei susijungia su cemento pagrindu, sudarydama apsauginį hidroizoliacinį sluoksnį [18]. Šiame tyrime nagrinėjamos skirtingų tipų emulsijos, kurių tikslas yra pagerinti porėto betono hidroizoliacines ir atsparumo apledėjimui savybes. Mėginiai buvo nugludinti iki hidroizoliacinio sluoksnio, o paviršius išlygintas kiek įmanoma tolygiau, kaip parodyta 2 paveiksle (žr. 2 pav.).



2 pav. Porėto betono struktūra aplikavus emulsiją



3 pav. Laiko intervalas, vaizduojantis vandens lašo nuslydimą nuo hidroizoliacinio sluoksnio [18]

Šepetėliu buvo pašalintos dulkės nuo pjūvio paviršiaus, po to atliktas riedėjimo kampo bandymas. Tarp porėto betono paviršiaus ir vandens lašų susidarė didelis kontakto kampas, todėl vandens lašai negalėjo išsilaikyti ant paviršiaus — jie greitai nuslydo, kaip parodyta 3 paveiksle (žr. 3 pav.). Toks vandeniui atsparus paviršius neleido jam prasiskverbti į gilesnius betono sluoksnius.

1.6. Projektuojamos kelio dangos ir joms keliami reikalavimai

Lietuvoje projektuojami keliai įrengiami vadovaujantis STR 2.06.04:2014 „*Gatvės ir vietinės reikšmės keliai. Bendrieji reikalavimai*“ [34] standartu. Gatvės dangą turi būti suprojektuota taip, kad leistų važiuoti numatytu greičiu ir užtikrintų saugų bei patogų eismą. Dangos konstrukcija ir tipas pasirenkami atsižvelgiant į transporto srauto intensyvumą ir sudėtį, gatvės kategoriją, klimatinės, gruntinės bei geologinės sąlygas, taip pat į galimybę naudoti vietoje, netoli esančiuose karjeruose, išgaunamas statybines medžiagas [34]. 1 lentelėje pateikiamos rekomenduotinos motorizuoto eismo

gatvių dangų konstrukcijų klasės, kad per numatytą eksploatacijos laikotarpį jos galėtų atlaikyti transporto apkrovas nesukeldamos pažeidimų dangos struktūrai [34].

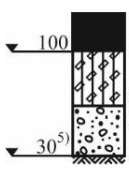
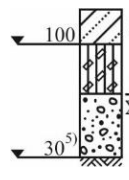
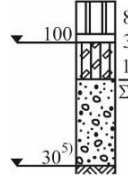
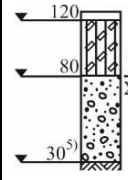
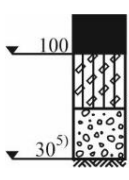
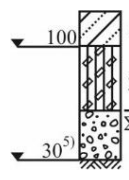
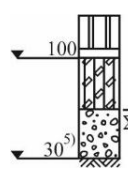
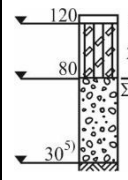
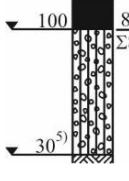
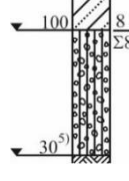
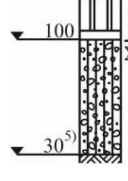
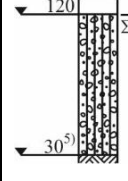
1 lentelė. Rekomenduojamos dangų konstrukcijų klasės pagal gatvių kategorijas pagal STR 2.06.04:2014 15 lentelę [34]

Eismo grupės	Gatvės ir susisiekimo linijų kategorijos	Dangos konstrukcijos klasė
Motorizuoto eismo	Greito eismo gatvės (A)	DK 100, DK 32, DK 10
	Pagrindinės gatvės (B)	DK 10, DK 3, DK 2
	Aptarnaujančios gatvės (C)	DK3; DK 2; DK 1
	Pagalbinės gatvės (D)	DK 0,3; DK 0,1
Nemotorizuoto eismo	Pėsčiųjų ir dviračių eismo gatvės, takai (E)	1)
	Pagalbiniai pėsčiųjų ir dviračių eismo takai,(F)	1)

1) - reikšmės pateikiamos 2 lentelėje.

Moksliniu darbu planuojama tirti mažo intensyvumo arba pėsčiųjų takų vandeniui pralaidžią kelio dangą, todėl, remiantis *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklėmis* [35], atsižvelgiama į F2 ir F3 klasės gruntų storius, kurie pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Pėsčiųjų ir dviračių takų dangų konstrukcijos ant F2 ir F3 klasės gruntų pagal 13 lentelę [35]

Eil. Nr.	Dangos konstrukcija su:	Asfalto danga	Betono danga	Trinkelų arba plokščių danga ¹⁾	Žvyro danga (dangos sluoksnis be rišiklių) ²⁾
1.	Danga	Skaldos pagrindo sluoksnis ant ŠNS			
	Pasluoksnis Skaldos pagrindo sl. $E_{v2} \geq 120(100)$ MPa ŠNS				
2.	Danga	Žvyro pagrindo sluoksnis ant ŠNS			
	Pasluoksnis Žvyro pagrindo sl. $E_{v2} \geq 120(100)$ MPa ŠNS				
3.	Danga	Pagrindo sluoksnis be rišiklių ant žemės sankasos			
	Pasluoksnis Pagrindo sluoksnis be rišiklių (SPS, ŽPS, AŠAS) $E_{v2} \geq 120(100)$ MPa				

Remiantis 2 lentele, betono dangos sluoksnis naudojant skaldą turi būti 8 cm, pasluoksnio – 15 cm, o skaldos pagrindo sluoksnis – 23 cm. Deformacijos modulio E_{v2} reikšmė turi siekti 120(100) MPa.

Dangos konstrukcijos storis turi užtikrinti pakankamą laikomąją gebą bei atsparumą šalčiui, atsižvelgiant į medžiagų savybes, aplinkos sąlygas, hidroterminį režimą ir gruntų charakteristikas. Iš apskaičiuotų storio variantų visuomet pasirenkamas didžiausias, siekiant garantuoti dangos patikimumą ir ilgaamžiškumą [35]. Projektuojant naujų dangų konstrukcijas siekiama užtikrinti ilgaamžiškumą ir tvarumą. Žemės sankasai numatoma ne mažesnė kaip 100 metų naudojimo trukmė be poreikio atnaujinti. Ekonomiškai pagrįsta naujų sluoksnių naudojimo trukmė [35]:

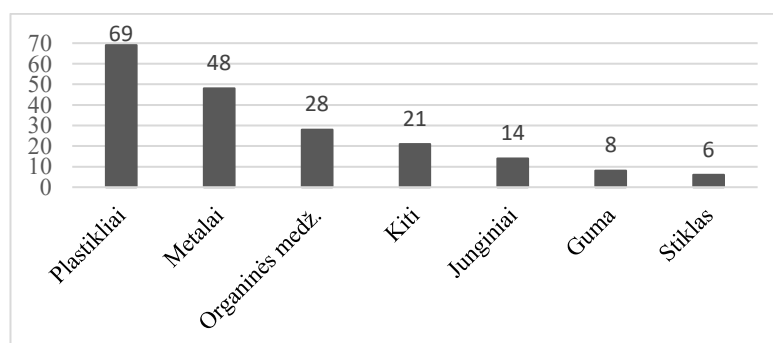
- viršutinis sluoksnis – 12–18 metų;
- apatinis – 20–30 metų;
- surištas pagrindo sluoksnis – 40–50 metų;
- pagrindo sluoksniai be rišiklių – 50–100 metų.

Todėl svarbu, kad tinkama sluoksnio danga būtų atitinkamo storio, atlaikytų apkrovas ir eksploatacinį laikotarpį. Taip pat svarbu atsižvelgti į gruntinio vandens lygį. Esant įprastoms klimato sąlygoms, galioja šios apribojimų taisyklės: esant aukštai drėgmei nerekomenduojama naudoti tokių medžiagų kaip dulkingas smėlis, smulkaus smėlio priemolis ir dulkingas priemolis kelių statyboje [19]. Tokie dirvožemiai naudojami tik sausose vietose, nes sudrėkę jie gerokai sumažina važiuojamosios dalies laikomąją galią ir sukelia jos deformaciją [19].

Vertinant pėsčiųjų takų konstrukciją, būtina atsižvelgti ne tik į dangos sluoksnių struktūrą ir storį, bet ir į jų laikomąją gebą. Remiantis LST EN 1991-2 „Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos“ [20], apkrova, tenkanti pėsčiųjų takams, yra 5 kN/m². Todėl pėsčiųjų takų dangos stiprumo rodikliai turi atitikti arba viršyti projektuojamą apkrovą.

1.7. Betonas, naudojamas dviračių ir pėsčiųjų takams

Moksliniuose straipsniuose pateikiama keletas betono kompozitų, naudojamų dviračių ir pėsčiųjų takams. Betono armavimui naudojami plieniniai pluoštai gali pagerinti jo savybes padidinant betono tvirtumą, plastiškumą ir atsparumą smūgiams, tuo pačiu sumažindami jo svorį ir tankį. Taip pat minėta medžiaga pagerina didelio stiprio ir svorio santykį [2]. Plieniniai pluoštai, kurie būna įvairių formų ar dydžių, yra dažniausiai naudojamas pluošto tipas. Vis dažniau siūloma pakeisti pirminius plieninius pluoštus perdirbtais pluoštais, gaunamais daugiausia iš naudotų padangų gumos atliekų. Plieniniai pluoštai, kurie yra sudaryti iš plastikų, metalo, organinių medžiagų, stiklo ir kt. (žr. 4 pav.) suteikia betonui plastiškumo, padidina jo atsparumą nuovargiui, smūgiams, sprogamams bei dilimui [2].



4 pav. Pagrindinės medžiagos, naudojamos perdirbtiems pluoštams gaminti [2]

Be to, minėtoji medžiaga riboja įtrūkimų pločio augimą. Norint pasiekti teigiamą poveikį, į betoną paprastai dedama apie 1–2 % pluoštų pagal tūrį [2]. Kita betono rūšis, naudojama dviračių ir pėsčiųjų takams – pralaidi vandeniui betoninė danga (PCP). Kaip tvarios infrastruktūros sprendimas, PCP gali būti naudojama pakeičiant įprastą betoną lėto greičio bei lengvųjų transporto priemonių keliams ar parkavimo paviršiams, šaligatviams [21]. Ši betono danga turi atvirų porų tinklą, kuris leidžia vandeniui patekti į gilesnius sluoksnius ir taip neleisti kauptis pačiame betone [21].

Dar viena danga, naudojama minėtiems takams, yra cemento betoninė modulinė danga arba prefabriuota betoninė danga. Tai yra pažangi ir naujos kartos technologija, pasižyminti aukšta kokybe, ilgaamžiškumu, greitu įrengimu ir lengva priežiūra [22]. Šį konceptą pristatė A. Vaitkus ir kt. [22] savo moksliniame darbe, kurio metu sukūrė ir išbandė septynias skirtingas betoninių plokščių kombinacijas. Tyrime naudojamas polipropileno pluoštu sustiprinto betono mišinys, kuris, kaip teigiama, yra geresnis nei plieno pluoštu sustiprintas betonas [22]. Taip pat betoninės dangos paviršiaus tekstūra turi įtakos tiek saugumui, tiek padangų ir kelio dangos keliamam triukšmui. Tokias savybes užtikrina atidengto užpildo betonas (EAC) – betono dangos paviršiaus apdorojimo technologija, kai ant šviežio betono paviršiaus purškiamas lėtiklis, o po kelių valandų nesukietėjęs skiedinys pašalinamas, taip atidengiant stambius užpildus [23]. Ši technologija užtikrina pradinį ir ilgalaikį padangų ir kelio dangos triukšmo mažinimą, tinkamą makrotekstūrą vandens drenažui bei geras sukibimo savybes.

Kita važiuojamai daliai naudojama betono rūšis – porėtas betonas. Šis betono mišinys sudarytas iš stambių užpildų, cemento, priedų ir vandens. Paprastai porėtas betonas turi 15–25 % oro porų, o jo tipinis atsparumas gniuždymui viršija 4,5 MPa [23]. Porėto betono dangos pasižymi geromis vandens pusrų savybėmis, užtikrina gerą sukibimą bei triukšmo mažinimo efektą dėl savo absorbcinių savybių [23]. Tačiau šių paviršių poros linkusios užsikimšti, todėl reikalinga speciali priežiūra [23]. EAC ir porėtas betonas yra tinkamiausi triukšmą mažinantys sprendimai greitkelių ir gatvių dangos viršutiniam sluoksniui, net ir esant dideliems eismo srautams bei sudėtingoms klimato sąlygoms [23]. Rekomenduojama naudoti aukščiausios kokybės užpildus, kurių maksimalus dydis – iki 8 mm [23]. Taip pat svarbu naudoti didesnę cemento kiekį ir mažesnę V/C santykį bei netolygaus granulometrinio sudėties pasiskirstymo užpildus [23].

1.8. Organinės medžiagos, naudojamos kelių betone

Projektuojant tradicines kelio dangas daugiausiai atsižvelgiama į komfortą, saugumą ir ilgaamžiškumą. Modernioji kelių inžinerija turėtų spręsti ir svarbias aplinkosaugos problemas, tokias kaip vandens pralaidumo gerinimas, triukšmo mažinimas, mažas šilumos įsisavinimas bei automobilių išmetamųjų teršalų ribojimas [24]. Ekologiškų kelių dangų tendencijos yra svarbios siekiant pagerinti esamą situaciją skatinant šiuolaikinės kelių inžinerijos pažangą [25]. Organinės medžiagos jau daugelį dešimtmečių plačiai naudojamos betono savybėms gerinti. Tačiau tikrojo skėtaro, dar žinomo kaip lietaus medis, medžio ankščių ekstrakto panaudojimas mažai tiriamas [26]. Šis medis dažniausiai sodinamas miestuose dėl didelės pavėsio dangos, nes turi labai plačią lają [26]. Lietaus medžio ankštys dažniausiai laikomos atliekomis, kurios lieka nepanaudotos. Tai paskatino ištirti medžio ankščių ekstrakto tinkamumą naudoti kaip plastifikatorių betono savybėms gerinti [26]. Norint išgauti ekstraktą, ankštys sutraiškomos, mirkomos vandenyje [27]. Išgautas tirpalas fermentuojamas, siekiant sumažinti cukraus kiekį, kuris lėtiną betono kietėjimą. Vėliau tirpalas kaitinamas iki virimo, siekiant pašalinti alkoholį, o po to aušinamas, kad būtų sustabdyta fermentacijos eiga. Šis tirpalas buvo naudojamas kaip natūralus plastifikatorius betone [27]. Tyrimo

rezultatai parodė, kad vidutinis betono gniuždomasis stipris po 7 parų padidėjo 6 %, palyginti su kontroliniu mišiniu [26].

Kita kelių betone naudojama organinė medžiaga – lipnūs ryžiai, kitaip vadinami vaškiniais arba glitniais ryžiais. Tai ryžių rūšis, daugiausia auginama Pietryčių ir Rytų Azijoje [27]. Kinijoje lipnūs ryžiai yra pagrindinis maisto produktas, tačiau taip pat jie plačiai naudojami ir daugelyje kitų sričių, įskaitant statybos darbus. Lipnių ryžių įmaišymas į oro kalkių skiedinį turi reikšmingą mechaninį poveikį siekiant didesnių gniuždymo stiprio rezultatų [28]. Ši organinė medžiaga gali sumažinti tiek šviežio, tiek sukietėjusio skiedinio tankį kietėjimo metu, o tai pagerina vandens įgėrimo savybes. Į kalkių skiedinį įmaišius 3 % lipnių ryžių, sumažėja betono trūkimo (susitraukimo) rizika [28].

Epoksidinės dervos yra vienas pagrindinių dervų tipų, naudojamų kaip struktūriniai klijai [29]. Ši medžiaga turi potencialą išspręsti tradicinių kelio dangų medžiagų trūkumus, tuo pačiu atitinkant griežtus aplinkos apsaugos reikalavimus [30]. Epoksidinės dervos pasižymi išskirtinėmis savybėmis, tokiomis kaip stiprumas, ilgaamžiškumas, mažas kietėjimo susitraukimas, suderinamumas su daugybe medžiagų, atsparumas korozijai ir chemikalams [31]. Dėl teigiamų savybių, sukurtų įvairiomis formulėmis su specifiniais kietėjimo priedais, epoksidinės dervos ir jų junginiai plačiai taikomi įvairiose srityse [32, 33]. Taip pat vandeniui tirpios epoksidinės dervos yra viena pagrindinių dervų, naudojamų polimerais modifikuoto betono ir skiedinio gamybai [34]. Qian Xiang ir Feipeng Xiaon [31] pateikia santrauką, kurioje daugiausiai aprašo epoksidinių dervų kietėjimo procesą ir epoksidinių medžiagų savybes, apimančias epoksidinį asfaltą ir epoksidinį betoną. Epoksidinių dervų pridėjimas gali pagerinti aukštos temperatūros stabilumą ir mechanines epoksidinio asfalto, betono mišinių savybes, nes epoksidinės dervos tinklinis ryšys riboja asfalto judėjimą [31]. Taip pat nurodoma, kad epoksidinis betonas turi puikias chemines savybes ir aukštą sukibimą. Epoksidinės dervos gali sukietėti ir be specialių kietiklių – jų kietėjimą gali inicijuoti pats cementas, todėl betone atsiranda galimybė atsirasti savęs gijimo procesams [31]. Todėl epoksidinės medžiagos dangose gali būti tinkama alternatyva dėl gero sukibimo ir atsparumo aukštoms temperatūroms.

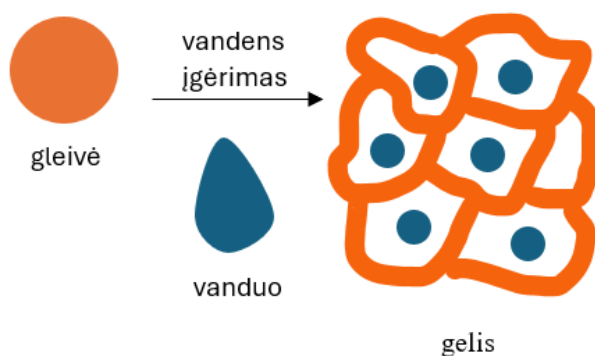
Tyrimai rodo, kad organinės medžiagos, tokios kaip lietaus medžio ankščių ekstraktas, lipnūs ryžiai ir epoksidinės dervos, gali reikšmingai pagerinti kelių betono savybes, įskaitant mechaninį stiprumą, vandens įgėrimo savybes ir atsparumą aplinkos veiksniams.

1.9. Gyslotis ir gysločio milteliai

Gysločio milteliai yra gaunami iš gysločio augalo (*Plantago*). Tai invazinis augalas, kilęs iš Europos ir Azijos, stipriai paplitęs visame pasaulyje. Gyslotis lengvai plinta ir yra išlaikomas antropogeninės veiklos. Šis augalas turi daug sėklų (> 20 000 sėklų viename augale), jos gali būti platinamos transporto priemonėmis, dirvožemiu ar žemės ūkio veikla [35].

Augalas dažniausiai randamas pievose ir kaip piktžolė ganyklose ar žemės ūkiuose. Gyslotis yra daugiametis augalas, tačiau taip pat gali augti kaip vienmetis augalas, kuris sėklas subrandina per šešias savaites po daigumo [35]. Piktžolė yra atspari mindymui ar sutankinimui, gali išgyventi net - 39 °C temperatūroje [35]. Gyslotis yra gerai prisitaikęs augalas gyventi molinguose, smėlinguose dirvožemio rūšyse [35]. Šis augalas taip pat žinomas ir dėl savo gydomųjų savybių. Jame yra feniletilo glikozidų, kurie naudojami uždegimams, gastritams ir opoms gydyti [35]. Norint gysloti panaudoti magistriniame darbe, reikia paruošti gysločio miltelius. Surinkti jauno gysločio lapai nuplaunami ir paliekami laisvai džiūti ore [36]. Vėliau sudžiūvę lapai yra sumalami į miltelių konsistenciją [36]. Taip paruošti gysločio milteliai tinkami naudoti tolimesniems bandiniams.

Behrooz Alizadeh Behbahani ir kt. [37] tyrime nagrinėja gysločio sudedamąją dalį – gleives. Plačialapis gyslotis, taip pat žinomas kaip paprastasis gyslotis, yra sėkla, kuri yra žiedinių augalų rūšis iš gysločių šeimos [37]. Augalas išaugina didelį kiekį sėklų. Sėklų apvalkale yra angliavandenių polimerų, kurie sugeria vandenį ir sudaro labai klampus gleives [37]. Gysločio sėklose yra apie 40 % gleivių, todėl, kai sėklos yra sumalamos į miltelius, gleivės sugeria vandenį ir sudaro klampų tirštą gelį. Dėl šios priežasties gysločio milteliai reaguodami su vandeniu kietėja (žr. 5 pav.).

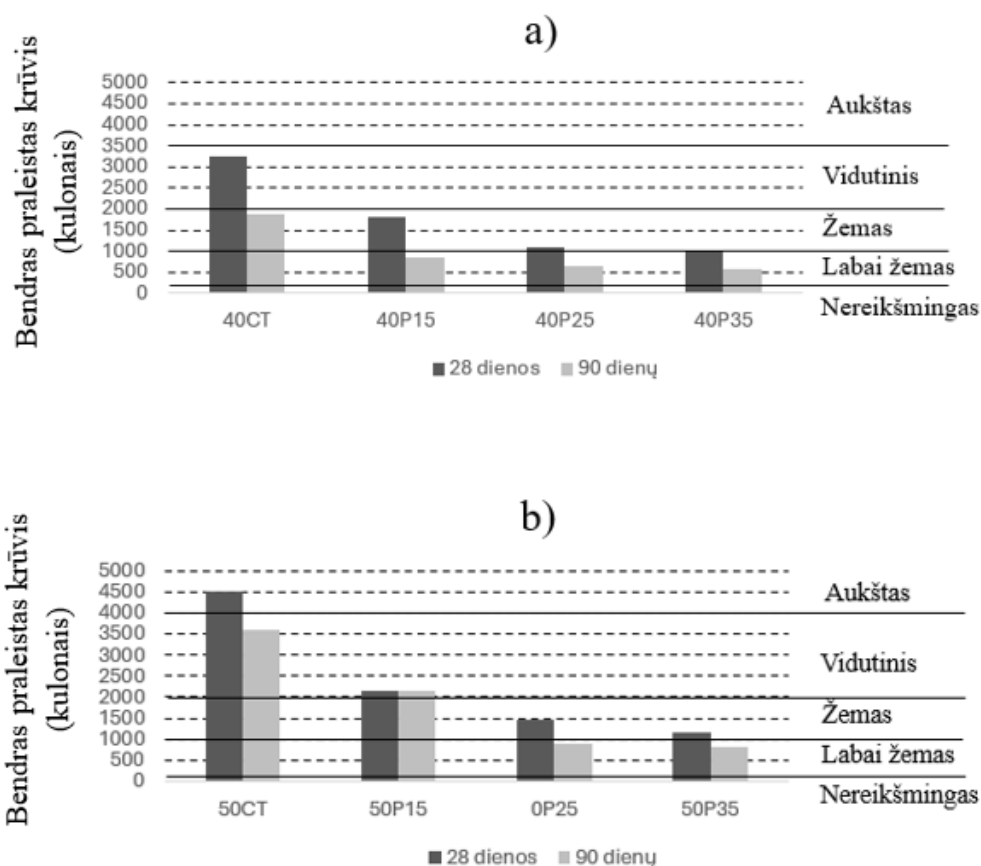


5 pav. Gysločio gleivės absorbcija vandeniu

1.10. Betono ilgaamžiškumo tyrimai

Šiandien dažniausiai naudojami betono ilgaamžiškumo rodikliai yra betono stiprio klasė ir vandens bei cemento (V/C) santykis [38]. Abu šie parametrai taikomi daugumoje pagrindinių Europos ir Šiaurės Amerikos normų bei standartų [38]. Atskiros šalys, priėmusios LST EN 206-1 „*Betonas. 1 dalis. Techniniai reikalavimai, savybės, gamyba ir atitiktis*“ standartą, dažnai reikšmingai modifikavo ribines vertes V/C santykiui ir cemento kiekiui. Paprastai, V/C santykio skirtumas siekia 0,15. Tai reiškia, kad nustatyti V/C santykiai, taikomi skirtingose šalyse pagal tą pačią poveikio klasę, gali skirtis net 0,15, kas yra reikšmingas skirtumas [38]. Be to, minimalus cemento kiekio intervalas yra labai platus, svyruojantis nuo 150 iki 340 kg/m³ ir nuo 150 iki 400 kg/m³ betoninėms konstrukcijoms, veikiamoms karbonatizacijos arba chloridų aplinkos [38].

Taip pat vandens ir rišiklio (V/R) santykis tiesiogiai veikia betono poringumo struktūrą ir gniuždomąjį stiprį. Todėl galima daryti prielaidą, kad didesnis stipris arba mažesnis V/R santykis lemia geresnes betono ilgaamžiškumo savybes. Atitinkamai literatūroje gausu laboratorinių tyrimų, kuriuose nustatytas teigiamas ryšys tarp mažėjančio V/R santykio ir betono ilgaamžiškumo [39]. Wachilakorn Sanawung ir kt. [40] atliktame tyrime apie palmių aliejaus kuro pelenų panaudojimą betone (POFA) paaiškėjo, kad V/R santykis betono gniuždomajam stipriui buvo panašus į tradicinio betono gniuždomąjį stiprį. Rezultatai (žr. 6 pav. ir 3 lentelė) parodė, kad POFA betonas su V/R santykiu 0,40 turėjo gniuždomuosius stiprius nuo 45,8 iki 55,9 MPa arba 82–94% OPC betono stiprio 90-ąją dieną. POFA betonas su V/R santykiu 0,50 turėjo gniuždomuosius stiprius nuo 33,9 iki 41,9 MPa arba 81–94% OPC betono stiprio. Tai reiškia, kad POFA betono gniuždomasis stipris padidėjo sumažinus V/R santykį [40].



6 pav. Chlorido jonų įsiskverbimas ir sumaltų POFA pelenų panaudojimas betone esant V/R santykiams 0,40 ir 0,50 [33]

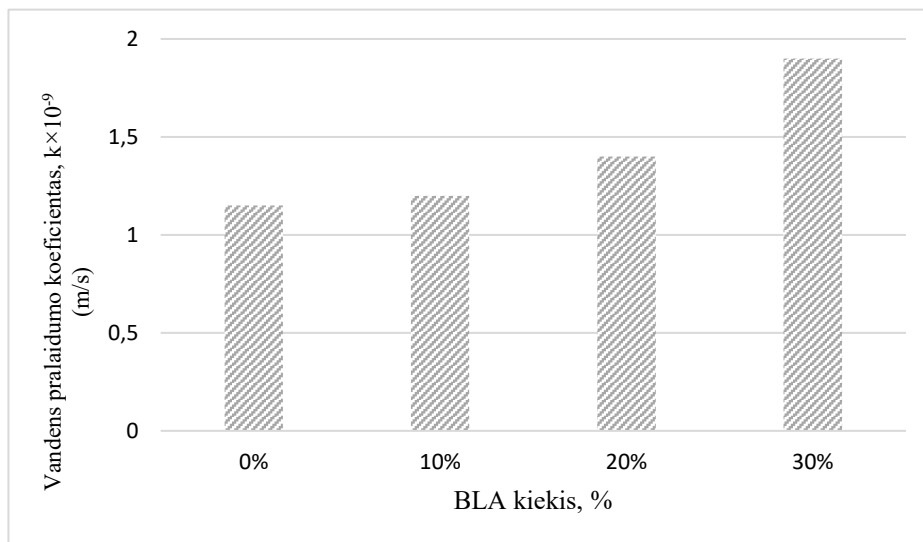
3 lentelė. Betono mišinių gniuždomieji stipriai ir chlorido jonų įsiskverbimas [33]

Mišinys	Gniuždomasis stipris (MPa) – normalizuota reikšmė (%)		Bendras krūvio kiekis (kulombais)– normalizuota reikšmė (%)	
	25 dienos	90 dienų	25 dienos	90 dienų
40CT	50.2-(100)	55.9-(100)	3236-100	1891-100
40P15	46.2-(92)	52.8-(94)	1798-56	823-44
40P25	43.3-(86)	50.9-(91)	1089-34	661-35
40P30	40.0-(80)	45.8-(82)	994-31	584-31
50CT	39.6-(100)	41.9-(100)	4507-100	3590-100
50P15	36.4-(92)	39.5-(94)	2410-47	1012-28
50P25	34.6-(88)	35.5-(85)	1459-32	890-25
50P30	31.7-(80)	33.9-(81)	1151-26	830-23

Remiantis pateiktais duomenimis, galima daryti išvadą, kad betono ilgaamžiškumui reikšmingą įtaką daro vandens ir cemento (V/C) bei vandens ir rišiklio (V/R) santykiai. Mažesni šie santykiai lemia mažesnę betono pralaidumą, tačiau didesnę gniuždomąją stiprį.

1.11. Betono vandens pralaidumo tyrimas

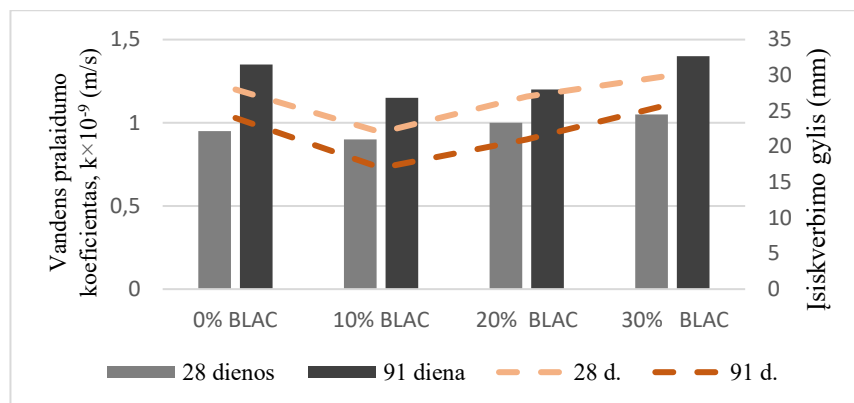
Kita savybė, svarbi tiriant kelių betoną, yra vandens pralaidumas. Nusrat Jahan Mim'as ir kt. [41] savo tyrime nagrinėjo mechanines, ilgaamžiškumo bei kitas savaime susitankinančio betono (SCC), kuriame dalis portlandcemenčio buvo pakeista atliekų pagrindu gautais bananų lapų pelenais, savybes. Darbo tikslu siekiama nustatyti optimalų bananų lapų miltelių (BLA) kiekį mišiniuose. Buvo tiriami betono mišiniai, kuriuose 10 %, 20 % ir 30 % portlandcemenčio buvo pakeista bananų lapų miltelių priedu [41].



7 pav. Vandens pralaidumo bandymų rezultatai SCC mišiniuose, kuriuose panaudotas skirtingas BLA kiekis

7 paveiksle pavaizduotas savaime susitankinančio betono mišinių, kuriuose naudojamas skirtingas BLA kiekis, pralaidumo koeficientas. Didesnis pralaidumo rodiklis atspindi intensyvesnę vandens įsiskverbimą į betono matricą. Tyrimo rezultatai parodė, kad vandens pralaidumas šiek tiek padidėjo didėjant BLA koncentracijai. Mišinys BLA0 turėjo mažiausią pralaidumo koeficientą – $1,07 \times 10^{-9}$ m/s, tuo tarpu BLA30 pasižymėjo didžiausiu – $1,97 \times 10^{-9}$ m/s. Lyginant su kontroliniu mišiniu (BLA0), mišinių su 10 % ir 20 % BLA vandens pralaidumas buvo šiek tiek didesnis [41]. Šį pokytį galima paaiškinti pagreitetą hidratacija. Vis dėlto, esant didesniai BLA pakaitos lygiui, mišinyje nepakako kalcio hidroksido, kad jis galėtų sureaguoti su pertekliniu BLA kiekiu [41]. Dėl to betono matricoje susidarė papildomų porų, kurios padidino vandens įgeriamumą.

Panašų rezultatą gavo Asif Mahmud Momshad'as ir kt. [42] darytame tyrime, kuriame įvertinami mechaninių, ilgaamžiškumo ir mikrostruktūrinių savybių pokyčiai betone, kuriame naudojami BLA, kartu analizuojant jo aplinkos ir ekonominį poveikį. Vandens pralaidumo tyrimo rezultatai pagal pralaidumo koeficientą pateikti 8 paveiksle (žr. 8 pav.). 28 dienų laikotarpiu bandinių vandens pralaidumo koeficientas sumažėjo 18,52 % ir 10,96 % esant 10 % ir 20 % BLA pakaitai, tačiau padidėjo 2,22 % esant 30 % BLA pakaitai, lyginant su kontroliniu bandiniu. 91 dieną 10 % BLAC vandens pralaidumo koeficientas sumažėjo 3,32 %, o 20 % ir 30 % BLAC padidėjo atitinkamai 2,45 % ir 4,03 %, lyginant su 0 % BLAC kontroliniu bandiniu [42].



8 pav. BLAC mišinių vandens pralaidumo tyrimų rezultatai

Tai rodo, kad 30 % BLAC vandens pralaidumo rezultatai nėra įspūdingi tiek 28, tiek 91 dienos laikotarpiu. Šį pokytį gali lemti pagreitėjusi hidratacija [42]. Tačiau 10 % BLAC ilgaamžiškumo augimo greitis buvo mažesnis, palyginti su 0 % BLAC ir 30 % BLAC mišinių. Šiuo atveju betono atsparumo greitis buvo didesnis 0 % BLAC ir 30 % BLAC mišiniuose, atitinkamai apie 27,70 % ir 27,09 %. Nepaisant to, pagal šio bandymo analizę, galima teigti, kad 10 % BLA pakaita yra optimalus pasirinkimas betonui tiek po 28, tiek po 91 dienos, nors atsparumo greitis buvo mažesnis lyginant su kontroliniu mišiniu.

1.12. Literatūros apžvalgos išvados

Didėjanti statybinių medžiagų paklausa, riboti gamtiniai ištekliai ir augantis aplinkosaugos sąmoningumas skatina ieškoti tvarių alternatyvų tradiciniam betonui. Šiuo požiūriu žiedinės ekonomikos principų taikymas statybose tampa itin svarbus, nes leidžia mažinti atliekų kiekį, optimizuoti natūralių resursų naudojimą bei mažinti CO₂ emisijas, susidarancias cemento gamybos metu. Betono ilgaamžiškumą ir mechanines savybes daugiausiai lemia vandens ir cemento (V/C) bei vandens ir rišiklio (V/R) santykiai. Mažesni šie santykiai lemia mažesnę betono poringumą ir didesnę gniuždomąją stiprį.

Literatūros analizės metu nustatyta, kad natūralūs ir perdirbti užpildai, tokie kaip smulkus kalkakmenis, komunaliniai atliekų pelenai ar perdirbtas agregatas, gali iš dalies veiksmingai pakeisti tradicinį betoną, mažinti cemento poreikį bei pagerinti ilgaamžiškumą, kartu mažinant statybos poveikį aplinkai. Tačiau pelenų kiekis turi būti optimalus, nes per didelis kiekis gali sumažinti gniuždomąją stiprį dėl kalcio aluminatų sumažėjimo ar padidėjusio poringumo. Be to, organinės medžiagos, tokios kaip lietaus medžio ankščių ekstraktas, lipnūs ryžiai ar epoksidinės dervos, gali pagerinti betono mechanines savybes, vandens pralaidumą ir atsparumą aplinkos poveikiui.

Literatūroje gysločio miltelių poveikis kompozito savybėms kol kas nagrinėtas nepakankamai, todėl jų derinimas su komunaliniais atliekų pelenais gali atverti naujas tyrimų kryptis kuriant tvarias vandeniui laidžias kompozitines dangas. Tai gali tapti perspektyvia alternatyva pėsčiųjų takų dangoms, atitinkančioms žiedinės ekonomikos ir aplinkosaugos principus.

Atsižvelgiant į literatūroje aprašytus sprendimus ir spragas, tolimesniame magistro darbo etape bus atliekami eksperimentiniai tyrimai su konkrečiomis ir racionaliomis sudėtimis, kuriomis siekiama įvertinti gysločio miltelių, kaip organinės kilmės rišiklio, poveikį pralaidaus betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms.

2. Tyrimų metodologija

Baigiamojo darbo tikslas – ištirti gysločio miltelių panaudojimo galimybes kuriant kompozitinį mišinį, tinkamą mažų apkrovų kelių dangoms, naudojant gysločio miltelius ir komunalinius pelenus kaip rišiklį. Kompozitų formavimo procesas susiduria su tam tikrais technologiniais iššūkiais, iš kurių vienas svarbiausių yra gysločio miltelių didelis vandens įgeriamumas, galintis neigiamai paveikti mišinio struktūrą ir eksploatacines savybes. Siekiant spręsti šią problemą, darbo metu atliekami mišinio sudėties optimizavimo bandymai, kuriais siekiama nustatyti tokį medžiagų santykį, kuris užtikrintų minimalų vandens įgėrį, tačiau išlaikytų pakankamą vandens laidumą, reikalingą dangos funkcionalumui. Tyrime taip pat nagrinėjama komunalinių pelenų ir emulsijos įtraukimo į mišinį įtaka kompozito fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei jo atsparumui aplinkos poveikiui. Skyriuje pateikiamas naudotų medžiagų ir taikytų tyrimo metodų aprašymas, kurie sudaro pagrindą tolesnei rezultatų analizei ir išvadų formulavimui.

2.1. Tyrime naudotos medžiagos

2.1.1. Gysločio milteliai

Gysločio milteliai, naudoti šiame magistriniame baigiamajame darbe, buvo gauti iš tiekėjo „Ponas Tadas“. Šie milteliai yra iš gysločio augalo pagaminta žaliava – šviesiai rudos spalvos smulkios frakcijos milteliai. Gamybos procesas apima augalinės žaliavos susmulkinimą ir terminį apdorojimą (išdeginimą) krosnyje iki miltelių pavidalo susidarymo. Tiekėjo pateikti gysločio milteliai papildomo paruošimo nereikalauja ir yra tinkami tiesioginiam naudojimui tolimesniuose eksperimentiniuose tyrimuose.

2.1.2. Komunaliniai pelenai

Magistriniame darbe, siekiant sumažinti 0/2 frakcijos atsijų naudojamo kiekio, papildomai naudojami komunaliniai pelenai, kurių prisikasama iš Lapių sąvartyno. Komunaliniai pelenai yra sudegintų komunalinių šiukšlių likučiai, panaudojami kaip žaliava statyboje. Šie pelenai yra sijojami per 2 mm sietyną ir taip paruošiami tolimesniam naudojimui (žr. 9 pav.).



9 pav. Prasijoti komunaliniai pelenai

2.1.3. Emulsija SikaControl® E-150

Be komunalinių pelenų, naudojama ir kita įmaiša į betoną – *SikaControl® E-150*. Tai paruošta naudoti polimero dispersija, skirta specialioms betono aplikacijoms, ypač skystam nepralaidžiam betonui. Ši priemonė lemia geresnį sukibimą, tankesnę struktūrą, padidina atsparumą cheminiam poveikiui, lemia aukštesnį ilgaamžiškumą. Gamintojo pateikta produkto informacija nurodoma 4 lentelėje.

4 lentelė. Gamintojo deklaruojamos produkto *SikaControl® E-150* savybės [43]

Produkto informacija	Reikšmė
Sudėtis	Vinilo acetato/etileno kopolimeras
Išvaizda ir spalva	Skysta / balta
Tankis	1,05 g/cm ³ (+20°C)
pH vertė	~ 4

2.1.4. 0/2 frakcijos granito atsijos

Tyrime bandymams buvo naudojamas pilkos spalvos 0/2 frakcijos granito atsijos iš tiekėjo „Ponas Tadas“, kurio stambiausios dalelės nedidesnės kaip 2,0 mm. Reikalinga frakcija gaunama parenkant atitinkamo dydžio sietynus. Parenkamas 2,0 mm sietynas, pro kurį patekusios atsijos yra tinkamos naudoti tolimesniuose darbo etapuose.

2.1.5. 2/5 frakcijos granito atsijos

Tyrime bandymams buvo naudojamas pilkos spalvos 2/5 frakcijos granito atsijos iš tiekėjo „Ponas Tadas“, kurio stambiausios dalelės nedidesnės nei 5,0 mm ir nemažesnės nei 2,0 mm. Reikalinga frakcija gaunama parenkant atitinkamo dydžio sietynus. Parenkamas 5,0 mm ir 2,0 mm sietynai. Atsijos, nusėdusios ant 2,0 mm sieto yra naudojamos tolimesniuose darbo etapuose.

2.1.6. Vanduo

Naudotas vanduo atitinka LST EN 1008:2005 standarte [44] nustatytus reikalavimus, pagal kuriuos vertinama jo tinkamumas kompozito gamybai. Vanduo priskiriamas geriamojo vandens kategorijai, todėl papildomi bandymai jo kokybei nustatyti nėra būtini.

2.2. Tyrimo metodai

2.2.1. 2/5 frakcijos granito atsijų padengimas su SikaControl® E-150 emulsija

Dalis bandinių yra gaminami su *SikaControl® E-150* baltos spalvos emulsija. Todėl 2/5 frakcijos granito atsijas reikia paruošti iš anksto. Pasvėrus tinkamą kiekį medžiagos reikia ją padėti ant nepergeriamos plėvelės ir į masę įpilti emulsijos. Emulsija būtina gerai prasklaidyti, kad ja pasidengtų visa granito atsijų masė. Atsijos patalpinamos į metalinę formą ir įdedamos į krosnį kaisti 40 laipsnių temperatūroje 30 min.

2.2.2. Mišinių sudėtys

Biokompozito mišinių gamybai naudojamos 0/2 frakcijos granito atsijos, 2/5 frakcijos granito atsijos, gysločio milteliai, vanduo ir *SikaControl® E-150* emulsija. Gauta mišinių masė yra pilama į iš anksto

suteptas formas. Formos su pagaminta mase yra dedamos ant vibracinės ir tankinamos. Sutankėjus masei, formose atsiranda laisvos vietos, todėl formas pakartotinai užpildomos mišiniu. Veiksmas kartojamas tol, kol forma yra užpildoma.

2.2.3. Mišinio maišymas ir bandinių formavimas

Prieš pradedant maišymą, kiekviena sudedamoji medžiaga pasverama svarstyklėmis ir atskirai sudedama į indus. Maišymui naudojamas sferinis indas ir mentelė, o procesas atliekamas rankiniu būdu.

Prieš formuojant bandinius prizmės, cilindro formos yra atitinkamai paruošiamos. Formos nuvalomos, ištepamos alyva tam, kad bandiniai kietėjimo metu nepriliptų prie sienelių ir neatsirastų sukibimas. Dėl geresnio bandinių sutankinimo panaudojamas vibro stalas su metaline priekale. Bandiniai vibro stale veikiami maždaug 5 sekundes, taikant 11,629 kg masės priekrovą. Pagal vibracinio stalo generuojamą svyravimų amplitudę A ir svyravimų dažnį f , nustatomas vibracijos pagreitis a ir intensyvumas I pagal formules:

$$a = (2\pi \cdot f)^2 \cdot A \quad (1)$$

čia: a – vibracijos pagreitis, m/s^2 ;

f – dažnis, Hz ;

A – amplitudė, m .

$$I = f^3 \cdot A^2 \quad (2)$$

čia: I – intensyvumas, m^2/s^3 .

Pagal apskaičiuotą pagreitį ir amplitudę suskaičiuojama apkrova, tenkanti bandiniui pagal F formulę:

$$F = m \cdot (g + a) \quad (3)$$

čia: F – aparato konstanta;

g – laisvojo kritimo pagreitis, $g = 9,81$;

m – apkrovos masė, kg .

Mišiniai supilami į formas (žr. 10 pav.) ir paliekami kietėti pagal numatytą laiką.



10 pav. Bandiniai CBR tyrimui

2.2.4. Cheminių cemento ir gysločio miltelių sudėčių nustatymas

Norint ištirti gysločio miltelių cheminę sudėtį, milteliai buvo analizuojami skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM) FEI QUANTA 200FEG (žr. 11 pav.). Didelę skiriamąją gebą skenuojančiam

elektroniniam mikroskopui suteikia lauko Schottky srities emisijos patranka (FEG). Skenuojant naudotos tokios darbinės sąlygos: aukšto vakuumo (HV) režimas – 5 kV. Prietaisas skirtas detaliam kietojo kūno paviršiaus tyrimui dideliu padidiniu. Naudojant skenuojantį elektroninį mikroskopą galima gauti vaizdus, pasižyminčius gerokai didesne skiriamąja geba ir ryškumo gyliu, palyginti su optiniais stereo mikroskopais. Aptikus charakteringus rentgeno spindulius, galima atlikti tiriamos medžiagos kokybinę ir kiekybinę cheminę analizę. Kai elektronų spindulys skenuoja bandinį tam tikra kryptimi, ekrane susiformuoja rentgeno spindulių intensyvumo pasiskirstymo vaizdas, atspindintis konkretaus cheminio elemento pasiskirstymą. Tyrimo metu gautas vaizdas buvo padidintas 200 kartų. Palyginimui atlikti tokiu pačiu principu ištiriamas cementas.



11 pav. SEM: Skenuojantis elektroninis mikroskopas – *FEI Quanta 200 FEG* [45]

2.2.5. Gysločio miltelių dalelių dydžio nustatymas Bleino prietaisu

Nustatomos gysločio miltelių dalelių dydis, siekiant įvertinti medžiagos smulkumą. Bandymas atliekamas su Bleino prietaisu, modeliu: 1.0290E (žr. 12 pav.) pagal LST EN 196:6 „*Cemento bandymų metodai. 6 dalis. Smulkumo nustatymas*“ metodologiją [46], paprastai naudojamą cemento dalelių smulkumui nustatyti. Nustatymai, naudojami bandymui – 220 V, 50 Hz. Prietaiso veikimo principas – pusiauautomatinis.

Gysločio miltelių smulkumas matuojamas kaip specifinis paviršiaus plotas, stebint laiką, per kurį tam tikras oro kiekis prateka per suspaustą miltelių sluoksnį, turintį nustatytus matmenis ir poringumą. Esant standartizuotoms sąlygoms, gysločio miltelių specifinis paviršiaus plotas yra proporcingas $\sqrt{t}$, kur t – tai laikas, per kurį nurodytas oro kiekis prateka per suspaustą miltelių sluoksnį. Porų skaičius ir dydžių pasiskirstymas šiame sluoksnyje priklauso nuo miltelių dalelių dydžio pasiskirstymo, kuris taip pat lemia oro pratekėjimo laiką [46].



12 pav. Bleino prietaisas

Laboratorijoje, kurioje atliekamas oro pralaidumo bandymas, turi būti palaikoma $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ temperatūra ir santykinė oro drėgmė ne didesnė kaip 65 %. Tiriamą cemento mėginį reikia suplakti 2 minutes užsukamame inde, kad išsisklaidytų sulipę grūdėliai. Po to palaukti 2 minutes, kad mėginys nusistovėtų. Galiausiai, švelniai išmaišyti švariu, sausu strypeliu, kad smulkesnės dalelės pasiskirstytų tolygiai visame mėginyje [46].

Pagal LST EN 196:6 [46] 4.6.1.2 formulę apskaičiuojamas specifinis paviršiaus plotas S , išreikštas cm^2/g :

$$S = \frac{K}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{e^3}}{(1 - e)} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \cdot \eta}}; \quad (4)$$

čia: K – aparato konstanta;

e – lovio poringumas, $e = 0,500$;

t – išmatuotas laikas, s;

ρ – gysločio miltelių tankis, g/cm^3 ;

η – oro klampa tyrimo temperatūroje, paimta iš 1 lentelės [46], Pa·s.

Konstanta K apskaičiuojama taip [46]:

$$K = \frac{S_0 \cdot \rho_0 \cdot (1 - e) \cdot \sqrt{10 \cdot \eta_0}}{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t_0}} \text{ arba pagal prietaiso } K \text{ konstantų 3 reikšmių vidurkį}; \quad (5)$$

$$K = \frac{K_1 + K_2 + K_3}{3}; \quad (6)$$

čia: S_0 – etaloninės medžiagos specifinis paviršiaus plotas kvadratiniais centimetrais gramui (cm^2/g);

ρ_0 – gysločio miltelių tankis, g/cm^3 ;

e – etaloninės medžiagos lovio poringumas;

ρ_0 – etaloninės medžiagos tankis, g/cm^3 ;

η_0 – oro klampa trijų etaloninės medžiagos temperatūrų vidurkiui, paimta iš 1 lentelės [46], $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

t_0 – trijų etaloninės medžiagos laikų vidurkis, s;

K_1, K_2, K_3 , – konstantos reikšmės, pateiktos ant aparato.

2.2.6. Bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas

Nėra gniuždymo stiprio nustatymo metodologijos, kuri tiktų biokompozito bandiniams, todėl naudojamosi LST EN 12390-3:2019 „*Sukietėjusio Betono Bandymai. 3 Dalis. Bandinių Gniuždymo Stipris*“ standartu [47].

Gniuždymo bandymams naudojamas įrenginys turi atitikti LST EN 12390-4:2019 [48] standarte nustatytus reikalavimus. Tyrimuose taikoma bandymo mašina „Toni Technik“ Nr.132/389, skirta betono, cemento ir gipso bandiniams bandyti, atliekant jų gniuždymo bandymus iki 600 kN apkrovos.

Bandinių paviršiai nušlifuojami ir nuvalomi nuo dulkių. Taip pat švariai nušluostomos bandinio įrenginio atraminiai paviršiai nuo dulkių ir drėgmės. Kubiniai bandiniai turi būti išdėstyti taip, kad apkrova būtų taikoma statmenai jų formavimo kryptčiai. Bandiniai ant apatinės plokštelės turi būti sucentruoti 1 % tikslumu [47] nuo nurodyto kubo formos bandinio dydžio. Nustatomas pastovus apkrovos didinimo greitis, o apkrova bandiniui perduodama be smūgių ir didinama pastoviu $\pm 10\%$ greičiu tol, kol toliau nedidėja [47].

Atlikus bandymą apskaičiuojamas gniuždymo stipris:

$$f_c = \frac{F}{A_c}; \quad (7)$$

čia: f_c – gniuždymo stipris, N/mm^2 ;

F – didžiausioji ardomoji apkrova, N;

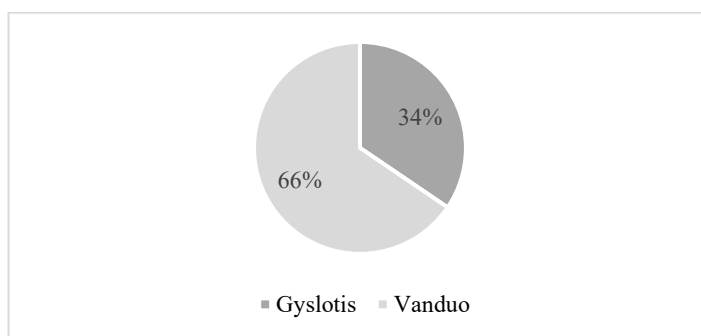
A_c – bandinio, kurį veikia gniuždymo jėga, skerspjūvio plotas, mm^2 .

Prizmės formos 200 mm x 50 mm x 50 mm bandiniai pasveriami ir išmatuojami. Vėliau prizmės formos bandiniai supjaustomi į 50mm x 50mm x 50mm kubelius, kad jų forma būtų tinkama gniuždomojo stiprio nustatymo bandymui atlikti. Matavimo aparate „Toni Technik“ parenkamas 30 N/s bandinių apkrovimas. Atsižvelgiama, kad kubeliai pjaustomi pjūklų, kuris pjaunant šlapina bandinius, todėl po supjaustymo bandiniai paliekami džiūti tris paras ir papildomai prieš matavimą palaikomi 50 °C laipsnių krosnyje 24 val. Pagal turimą plotą ir gautą gniuždymo jėgą, pagal 3 formulę apskaičiuojamas gniuždymo stipris. Tiksliesniems rezultatams nustatyti iš kiekvieno mišinio atrenkami trys kubelio formos mėginiai.

2.2.7. Mechaninio gysločio miltelių sumaišytų su vandeniu atsparumo testas

Siekiant nustatyti, ar gysločio milteliai pasižymi savaiminiu stiprumu bei įvertinti jo dydį, buvo paruoštas vandens ir gysločio miltelių mišinys, kurio proporcijos pateiktos 14 paveikslėlyje (žr. 13 pav.). Bandiniai išformuojami cilindrinės formos indelyje, kurio skersmuo $d = 20$ mm, bandinių ilgis

– 25 mm. Į kiekvieno bandinio sudėtį įmaišoma 15,80 g gysločio miltelių, vandens – 30,01 ml. Tyrime bus gniuždomi du bandiniai.



13 pav. Procentinė mišinio sudėtis

Bandinys gniuždomas pagal 2.2.8 gniuždomojo stiprio nustatymo metodologiją.

2.2.8. Vandens pralaidumo bandymas

Bandinio pralaidumui nustatyti atliekamas vandens pralaidumo testas pagal LST EN 12697-19:2020 „*Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 19 dalis. Bandinio pralaidumas*“ standartą [49] naudojantis vandens pralaidumo sistema (žr. 14 pav.).



14 pav. Vertikalaus vandens pralaidumo nustatymo prietaisas

Paruošiami cilindriniai laboratoriniai mišiniai bandymui atlikti. Cilindriniam mėginiui taikomas pastovaus aukščio vandens stulpelis, leidžiantis vandeniui tam tikrą laiką filtruotis per mėginį vertikalia arba horizontalia kryptimi, priklausomai nuo tiriamo parametro. Šiame moksliniame darbe nustatomas tik vertikalios krypties vandens pralaidumas, nes šis rodiklis būna blogesnis. Gautas vandens srauto debitas (Q_v arba Q_h) naudojamas apskaičiuoti pralaidumo koeficientą (K_v arba K_h). Bandymas atliekamas 15 – 25 °C laipsnių aplinkos temperatūroje.

Vamzdžio išorinis skersmuo ir jungiamųjų detalių matmenys turi būti tokie, kad tarp vamzdžio sienelės ir mėginio paviršiaus nebūtų vandens pratekėjimo. Vamzdžio sienelės storis turi būti pakankamas formos stabilumui užtikrinti, tačiau neturi viršyti 5 mm. Vamzdžio išorinis skersmuo paprastai turėtų būti iki 5 mm didesnis nei mėginio skersmuo [005]. Pagal metodiką mėginys turi būti

įstatomas į guminį rankogalį, tačiau šiame tyrime mėginiai kietėjo PVC vamzdžiuose, o jų viršutinė dalis buvo hermetiškai pritvirtinta silikonine sandarinimo medžiaga dėl sandarumo (žr. 15 pav.).



15 pav. Cilindrinių bandinių paruošimas vandens pralaidumo bandymui

Į vamzdį įstatomas bandinys su PVC vamzdžiu. Po apačia padedamas perforuota plokštelė, bandinys įstatomas į vandens talpą taip, kad būtų apsemtas. Vandeniui leidžiama tekėti tiek laiko, kad mėginys prisotintu vandeniu ir pasišalintų uždaras oras. Vamzdyje turi būti įrengtas ištekėjimo angos mechanizmas, kuris užtikrina, kad vandens stulpelio aukštis išliktų pastovus [49].

Leisti vandeniui tekėti per mėginį į surinkimo indą. Šis indas turi būti pastatytas virš antrojo indo, kurio masė žymima m , taip, kad vanduo, pratekęs per mėginį, galėtų laisvai persipilti į antrąjį indą iki mėginio viršutinio paviršiaus lygio. Nustatomas laikas, per kurį teką vanduo, o surinktas vanduo yra pasveriamas [49]. Bandymas kartojamas kelis kartus.

Apskaičiuojamas vandens debitas Q_v nuo vertikalaus vandens tekėjimo per mėginį:

$$Q_v = \frac{(m_2 - m_1)}{t} \cdot 10^{-6}; \quad (8)$$

čia: Q_v – vandens debitas, m^3/s ;

m_1 – pirmojo indo surinkto vandens masė, apvalinti iki 0,5 g;

m_2 – antrojo indo surinkto vandens masė, apvalinti iki 0,5 g;

t – vandens surinkimo laikas, s.

Apskaičiuojamas vertikalus vandens pralaidumas K_v :

$$K_v = \frac{4 \cdot Q_v \cdot l}{h \cdot \pi \cdot D^2}; \quad (9)$$

čia: K_v – vertikalus vandens pralaidumas, m/s ;

Q_v – vandens debitas, m^3/s ;

l – mėginio storis, m;

h – faktinis vandens stulpelio aukštis, m;

D – mėginio skersmuo, m.

Nustatytos K_v koeficiento vertės turi būti lygios arba viršyti $1,0 \times 10^{-5}$ deklaruojamą reikšmę [50], priešingu atveju bandinys laikomas nepralaidus vandeniui.

2.2.9. Laikomosios gebos Kalifornijos rodiklio nustatymas

Nustatomas laikomosios gebos Kalifornijos rodiklio (CBR) tyrimas pagal LST EN 13286-47:2021 [51]. Kalifornijos rodiklis naudojamas mišinio laikomajai gebai įvertinti, nustatomas iškart po sutankinimo arba po tam tikro kietėjimo laikotarpio.

Forma su prijungtu prailginamuoju žiedu pritvirtinama prie pagrindo plokštelės. Prieš pradėdant mėginio formavimą, CBR bandinio surinkimo sistema turi būti padėta ant kieto ir stabilaus pagrindo. Mišinys į formą sutankinamas naudojant priekrovą, kuri buvo naudojama bandiniams, nustatyti gniuždomąjį stiprį [51]. Po sutankinimo nuimamas prailginamasis žiedas, o mišinio paviršius atsargiai sulyginamas su formos viršumi grandikliu, tikrinant paviršiaus lygumą su gulsčiu. Paviršiuje susidariusios ertmės gali būti užtaisomos smulkesnės frakcijos medžiaga, kad būtų užtikrintas tolygus mėginio paviršius [51]. Nuimama pagrindo plokštelė ir pasveriamas forma su mišiniu, masė fiksuojama 5 g tikslumu. Pagal standarte taikomus kietėjimo tipus, parenkamas C kietėjimo tipas – kietėjimas sausumoje. Fiksuojamas laikas, aplinkos temperatūra, kurioje bandiniai kietėja [51].

Bandymo veikimo principas grindžiamas jėgos ir įsiskverbimo gylio (penetracijos) priklausomybės nustatymu. Atliekant bandymą, cilindrinis stūmoklis su standartiniu skerspjūvio plotu įspaudžiamas į formoje esantį mišinio mėginį pastoviu, nustatytu greičiu (žr. 16 pav.). Kalifornijos laikomosios gebos rodiklis (CBR) rodiklis nustatomas įvertinant stūmokliui tenkančią jėgą esant tam tikram įsiskverbimo gyliui ir išreiškiant ją procentine dalimi nuo etaloninės (standartinės) jėgos vertės, taip įvertinant mėginio laikomąją gebą [51].



16 pav. Prietaisas CBR nustatyti

2.2.10. Atsparumo UV spinduliuotės poveikiui nustatymas

Atsparumas UV poveikiui nustatomas remiantis ATLAS Weathering Testing Guidebook (JAV) [52]. Ciklą sudarė 300 min UV spinduliuotės poveikio (UVA-340 lempos, $(50 \pm 3) ^\circ\text{C}$, apšvitos intensyvumas $0,68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{nm}$ 340 nm ir 60 min vandens purškimas – „lietus“. Pagreitinto senėjimo trukmė negali būti tiesiogiai konvertuojama į natūralaus senėjimo laiką. Vis dėlto, pagreitinto senėjimo eksperimentų rezultatai leidžia netiesiogiai įvertinti natūralaus senėjimo proceso intensyvumą. ATLAS Weathering Testing Guidebook (JAV) [52] duomenimis 240 val. švitinimo UVA 340 lempomis (žr. 17 pav.), esant apšvitos intensyvumui $0,68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{nm}$ 340 nm ilgio bangų diapazone (kuris atitinka saulės spektrą UVA spindulių dalyje) sąlyginai atitinka vienerių metų

natūralią saulės apšvitą vidutinio klimato juostoje. Tyrimo bandymas buvo atliekamas 240 val., kas apytiksliai atitinka 9,6 mėnesio natūralaus senėjimo laiko trukmę. Bandinių išvaizda po švitinimo UV lempomis ir purškimo vandeniu palyginama su nešvitintais bandiniais ir įvertinta pagal standartų reikalavimus.



17 pav. Bandinių laikymas UV spintoje

2.2.11. Medžiagų šalčiui atsparumo tyrimas

Bandinio atsparumo šalčiui tyrimas atliekamas KHC – 2 N10032 šaldymo kameroje remiantis ciklų užšalimo – atšildymo metodais. Parenkamas tūrinis šalčio atsparumo tyrimas pagal LST EN 1367-1 [53] reikalavimus, todėl bandiniai prieš ir po yra pasveriami. Bandiniams taikoma 30 ciklų programa — po 3 ciklus per parą, imituojant ilgalaikę eksploataciją. Toks 30 ciklų skaičius teoriškai atitinka maždaug dvejų metų natūralios eksploatacijos sąlygas.

Cilindriniai Ø45×100 mm ir kubelių formos 50×50×50 bandiniai pamirkomi 20 min vandenyje (žr. 18 pav.), vėliau dedami į šaldymo kamerą. Bandiniai šaldymo kameroje -18 ± 2 °C temperatūroje laikomi numatytą laiką. Po to, bandiniai yra išimami iš šaldymo kameros ir pasveriami.

Pagal LST EN 1367-1 [53] apskaičiuojamas masės nuostolis, kuris išreiškiamas procentine dalimi:

$$F = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \cdot 100; \quad (10)$$

čia: F – bandinių masės nuostolio procentinė dalis po užšaldymo – atšildymo ciklų;

m_1 – bandinio sausoji masė, g;

m_2 – šlapio bandinio masė po bandymo, g.



18 pav. Bandinių mirkymas vandenyje

2.2.12. Gysločio miltelių, komunalinių pelenų hidratacijos tyrimas pusiau adiabatiniu kalorimetrijos metodu

Atliekamas gysločio miltelių ir komunalinių pelenų hidratacijos tyrimas pusiau adiabatiniu kalorimetru remiantis LST EN 196-9:2010 standartu [50]. Adiabatinis procesas apibūdina termodinaminės sistemos būsenos kitimą, kai nevyksta šilumos mainai su aplinka. Pusiau adiabatinio metodo principas grindžiamas tuo, kad šviežias skiedinys įdedamas į kalorimetrą (žr. 19 pav.), kuriame registruojamas hidratacijos metu išsiskiriantis šilumos kiekis. Tiriamuoju momentu cemento hidratacijos metu susidaranti šiluma yra lygi kalorimetre sukauptai šilumai ir per bandymo laikotarpį į aplinką prarastai šilumos daliai. Tyrimo metu maišoma 100 g teslos, supilama į 30 ml indelius. Tyrimo metu fiksuojamas laikas, per kurį mišinys pasiekė aukščiausią temperatūrą. Medžiaga nėra visiškai izoliuota nuo aplinkos, todėl šis procesas apibrėžiamas kaip pusiau adiabatinis. Šiuo tyrimu siekiama įvertinti gysločio miltelių ir komunalinių pelenų poveikį mišinio teslos hidratacijos eigai.



19 pav. Pusiau adiabatinio kalorimetro tyrimas

3. Tyrimų rezultatai ir diskusija

3.1. 2/5 frakcijos granito atsijų padengimo su *SikaControl® E-150* emulsija rezultatai

Atliekant šį bandymą buvo siekiama išsiaiškinti, ar 2/5 fr. granito atsijos padengimas *SikaControl® E-150* emulsija (žr. 20 pav.) gali duoti realių stiprumo rezultatų. Emulsija buvo taikyta tik 2/5 frakcijos atsijoms, nes gysločio milteliai ar pelenai, esant tiesioginiam kontaktui su emulsija, linkę agreguotis į gumulus. *SikaControl® E-150* emulsija buvo pasirinkta dėl, tikėtina, geresnio užpildo sukibimo su biokompozito tešla, tankesnės struktūros formavimosi ir ilgesnio eksploatacinio ilgaamžiškumo. Gauti tyrimų rezultatai leidžia daryti prielaidą, kad emulsijos panaudojimas galėjo prisidėti prie papildomo bandinių stiprumo padidėjimo.



20 pav. 2/5 fr. granito atsijos padengtos *SikaControl® E-150* emulsija

3.2. Mišinių sudėčių rezultatai

Suformuoti 8 skirtingų mišinių bandiniai iš 0/2 frakcijos granito atsijų, 2/5 frakcijos granito atsijų, gysločio miltelių, vandens ir *SikaControl® E-150* emulsijos. Mišinių sudėtys pateikiamos 5 lentelėje.

Suformuotos 8 bandinių grupės: kontroliniai bandiniai B0 (skirtingų frakcijų atsijos, gyslotis ir vanduo), bandiniai su emulsija B0+ (skirtingų frakcijų atsijos, gyslotis, vanduo ir emulsija) ir neimpregnuoti B10, B20, B30 bei impregnuoti B10+, B20+, B30+ bandiniai su skirtingu procentu komunalinių pelenų kiekiu (10 %, 20 %, 30 %), kurie sudėtyse atitinkamai keičia 0/2 frakcijos granito atsijas. Kiekvienai iš šių grupių formuojama po 3 vienetus bandinių, kurių kiekvienas yra 200 mm×50 mm×50 mm dydžio.

5 lentelė. Biokompozito mišinių sudėtys prizmių formoms

Medžiagos Bandinys	0/2 fr. granito atsijos, g	2/5 fr. granito atsijos, g	Gysločio milteliai, g	Vanduo, ml	Emulsija, ml	0/2 fr. komunaliniai pelenai, g
B0	1725	450	112,5	525	-	-
B0+	1725	450	112,5	525	7,5	-
B10	1552,5	450	112,5	525	-	172,5
B20	1380	450	112,5	525	-	345
B30	1207,5	450	112,5	525	-	517,5
B10+	1552,5	450	112,5	525	7,5	172,5

5 lentelės tęsinys.

Medžiagos Bandinys	0/2 fr. granito atsijos, g	2/5 fr. granito atsijos, g	Gysločio milteliai, g	Vanduo, ml	Emulsija, ml	0/2 fr. komunaliniai pelenai, g
B20+	1380	450	112,5	525	7,5	345
B30+	1207,5	450	112,5	525	7,5	517,5

Analogiškai, kiekvienai iš 8 grupių skirtingų mišinių formuojama po 1 cilindro formos 100 mm ilgio ir 50 mm diametro (formelės sienelės storis 2,5 mm) bandinį, kuris bus skirtas vandens pralaidumui nustatyti. Mišinių kiekiai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Biokompozito mišinių sudėtys cilindro formoms

Medžiagos Bandinys	0/2 fr. granito atsijos, g	2/5 fr. granito atsijos, g	Gysločio milteliai, g	Vanduo, ml	Emulsija, ml	0/2 fr. komunaliniai pelenai, g
B0	287,5	75	18,75	87,5	-	-
B0+	287,5	75	18,75	87,5	1,25	-
B10	258,8	75	18,75	87,5	-	28,8
B20	230	75	18,75	87,5	-	57,5
B30	201,3	75	18,75	87,5	-	86,3
B10+	258,8	75	18,75	87,5	1,25	28,8
B20+	230	75	18,75	87,5	1,25	57,5
B30+	201,3	75	18,75	87,5	1,25	86,3

Atsižvelgiant į gniuždomojo stiprio bandymų rezultatus, parenkami trys skirtingos sudėties mišiniai Kalifornijos laikomosios gebos rodikliui (CBR) nustatyti. Bandiniai formuojami Ø150×120 mm matmenų cilindrinėse formose, o detali mišinių sudėtis pateikiama 7 lentelėje.

7 lentelė. Biokompozito mišinių sudėtys cilindro formoms CBR tyrimui

Medžiagos Bandinys	0/2 fr. granito atsijos, g	2/5 fr. granito atsijos, g	Gysločio milteliai, g	Vanduo, ml	Emulsija, ml	0/2 fr. komunaliniai pelenai, g
B0	2439,00	636,17	159,04	742,20	-	-
B10	2192,40	636,17	159,04	742,20	-	243,60
B20+	1950,93	636,17	159,04	742,20	31,80	487,73

3.3. Bandinių maišymo ir formavimo rezultatai

Visų grupių mišiniai ruošiami vienodu būdu, laikantis to paties veiksmų eiliškumo. Į sferinį indą supilamos visos sausos medžiagos: 0/2 frakcijos granito atsijos, komunaliniai pelenai, 2/5 frakcijos granitas ir gysločio milteliai. Sausos medžiagos kruopščiai išmaišomos mentele. Lėtai į indą pilamas vanduo ir visa masė iš lėto maišoma iki vientisos konsistencijos, kad tolygiai sudrėktų visos sausos dalelės, jos nesusoktų.

Po mišinio sumaišymo atliekamas piršto testas, padedantis nustatyti konsistencijos tinkamumą ir stiprumą. Nedidelis kiekis šviežiai sumaišyto mėginio paimamas ir suformuojamas į rutuliuką. Tada į jį švelniai įspaudžiamas pirštas – taip patikrinamas mišinio drėgnumas ir vientisumas (žr. 21 pav.). Testas pasitvirtino, visiems bandiniams naudota po 18,67 % vandens nuo mišinio masės.



21 pav. Piršto įspaudimo testas

Siekiant užtikrinti geresnį bandinių sutankinimą, buvo naudojamas vibracinis stalas su papildoma metaline apkrova. Bandiniai 5 sekundes vibruojami juos veikiant 11,629 kg masės priekrova. Vibracinio stalo generuojamų svyravimų amplitudė yra 2,8 mm, o svyravimų dažnis – 60 Hz. Nustatomas vibracijos pagreitis a ir intensyvumas I :

$$a = (2\pi \cdot f)^2 \cdot A = (2\pi \cdot 60)^2 \cdot 0,0028 = 397,93 \approx 398 \text{ m/s}^2. \quad (11)$$

$$I = f^3 \cdot A^2 = 60^3 \cdot 0,0028^2 = 1,69 \text{ m}^2/\text{s}^3. \quad (12)$$

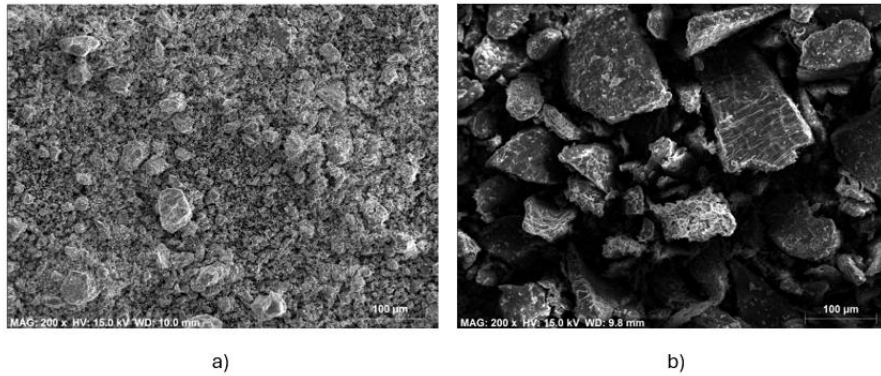
Pagal apskaičiuotą pagreitį ir amplitudę įvertinama apkrova, tenkanti bandiniui:

$$F = m \cdot (g + a) = 11,63 \cdot (9,81 + 398) = 4742 \text{ N} = 4,7 \text{ kN}. \quad (13)$$

Apskaičiuoti vibraciniai parametrai parodė, kad taikant 2,8 mm amplitudės ir 60 Hz dažnio vibraciją susidaro didelis pagreitis (398 m/s^2) ir vibracijos intensyvumas ($1,69 \text{ m}^2/\text{s}^3$), kurie kartu su 11,629 kg sveriančia priekrova sukuria 4,7 kN dydžio dinaminę apkrovą. Naudojama vibracinė apkrova yra pakankama efektyviam bandinių sutankinimui, užtikrinant tolygesnę jų struktūrą ir geresnes fizines savybes.

3.4. Cheminių cemento ir gysločio miltelių sudėčių nustatymo rezultatai

Atliktas cemento ir gysločio miltelių cheminių analizinių palyginimas. Gauti rezultatai pateikiami 18 nuotraukoje (žr. 22 pav.). Iš nuotraukų galima matyti, kad gysločio miltelių dalelių struktūra yra nevienalytė, dalelės daug didesnės, netolygios, aštrių kampų ir lūžio paviršių. Tarp dalelių yra didesni tarpai, tai rodo poringesnę struktūrą. Cemento dalelės atrodo vientisesnės, apvalesnės, smulkesnės, dalelių kampai apvalėjantys, o paviršius šiurkštus, nėra didelių tarpų tarp dalelių.



22 pav. SEM nuotraukos: a) cemento dalelės $\times 200$ b) gysločio miltelių dalelės $\times 200$

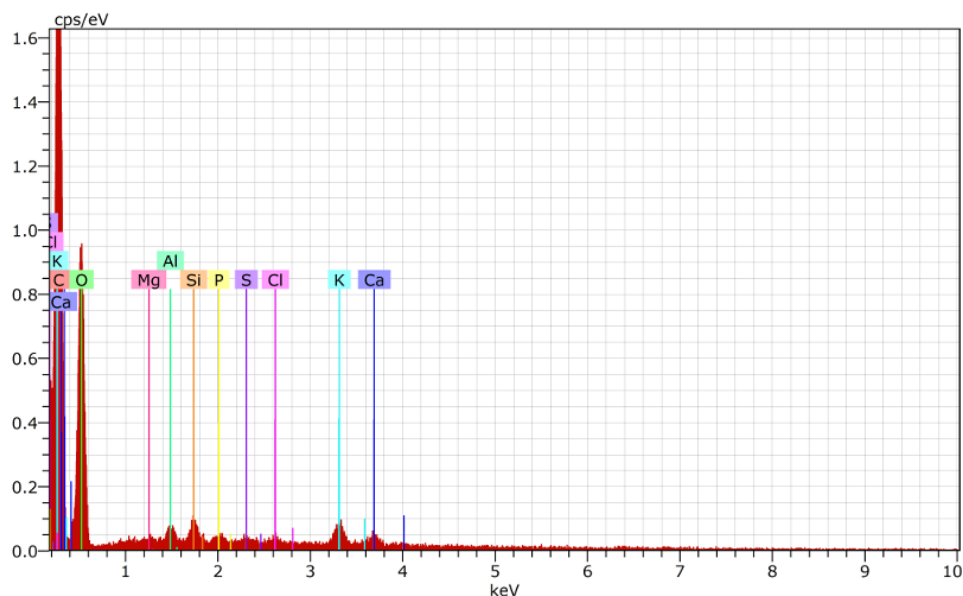
Abiejų medžiagų cheminės sudėtys ir analizė pateikiamos 8, 9 lentelėse ir 23 paveikslėlyje.

8 lentelė. Gysločio miltelių cheminė sudėtis

Elementas	Koncentracija (%)
Anglis (C)	37,82
Deguonis (O)	57,92
Kalcis (Ca)	0,91
Kalis (K)	1,47
Silicis (Si)	0,62
Aliuminis (Al), fosforas (P), siera (S), magnis (Mg), chloras (Cl)	<0,5

9 lentelė. Cemento miltelių cheminė sudėtis

Elementas	Koncentracija (%)
Kalcis (Ca)	49,75
Deguonis (O)	33,33
Silicis (Si)	6,09
Geležis (Fe)	4,09
Aliuminis (Al)	2,03
Siera (S)	1,35
Kalis (K), magnis (Mg), anglis (C)	<1



23 pav. Gysločio miltelių cheminių elementų pasiskirstymo intensyvumo kreivės

Iš rezultatų matyti, kad cementas, sudarytas iš kalcio, silicio, aliuminio ir geležies oksidų, yra neorganinė, mineralinės kilmės medžiaga. Gysločio milteliai, priešingai, yra organinės, augalinės kilmės, pasižymi didele anglies (38 %) ir deguonies (58 %) koncentracija. Šie skirtumai lemia skirtingas fizines, chemines ir mechanines savybes: cementas veikia kaip rišamoji medžiaga, o gysločio milteliai – kaip organinė užpildo ar priedo medžiaga. Todėl komunalinių pelenų įmaišymas gali veikti kaip cemento pakaitalas mišinyje.

3.5. Gysločio miltelių dalelių dydžio nustatymo Bleino prietaisu rezultatai

Atlikus bandymą nustatyti gysločio miltelių dalelių smulkumui, gauti tokie duomenys:

- trijų matavimų vidutinis laikas, $t = 14,34$ s;
- gysločio miltelių masė, $m = 1,384$ g;
- kameros tūris, $V = 1,86$ cm³;
- patalpos temperatūra, $T = 22$ °C.

Pagal LST EN 196:6 [46] 4.6.1.2 formulę apskaičiuojamas specifinis paviršiaus plotas S , išreikštas cm²/g:

$$S = \frac{K}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \cdot \eta}} = \frac{2,34}{\frac{1,384}{1,86}} \cdot \frac{\sqrt{0,500^3}}{(1-0,500)} \cdot \frac{\sqrt{14,34}}{0,013524} = 622,5 \text{ cm}^2/\text{g}. \quad (14)$$

Konstanta K apskaičiuojama taip [46]:

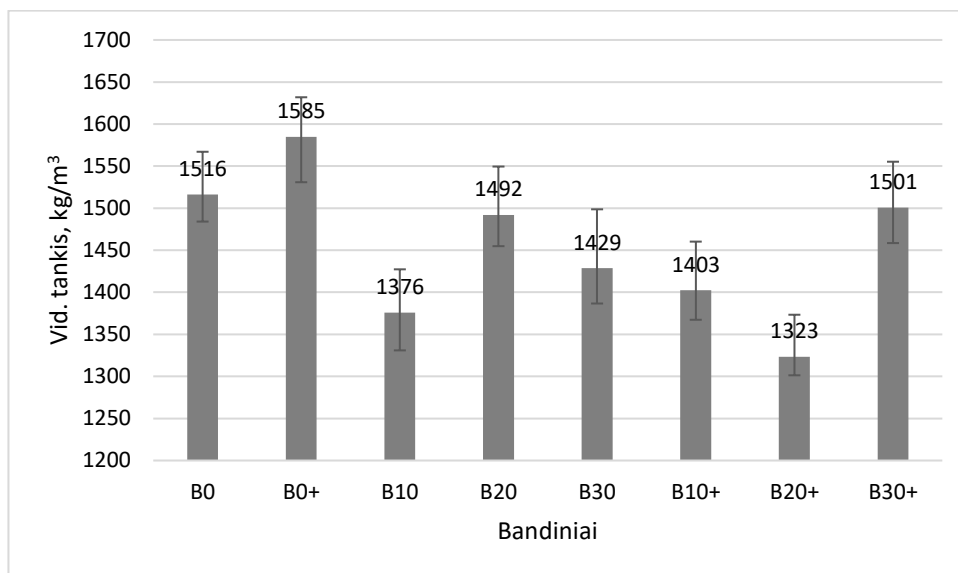
$$K = \frac{K_1 + K_2 + K_3}{3} = \frac{2,02 + 2,37 + 2,64}{3} = 2,34. \quad (15)$$

Atlikus tyrimą Bleino prietaisu, nustatyta, kad gysločio miltelių specifinis paviršiaus plotas yra 622,5 cm²/g. Lyginant su standartine cemento specifinio paviršiaus ploto verte, kuri yra apie 4500

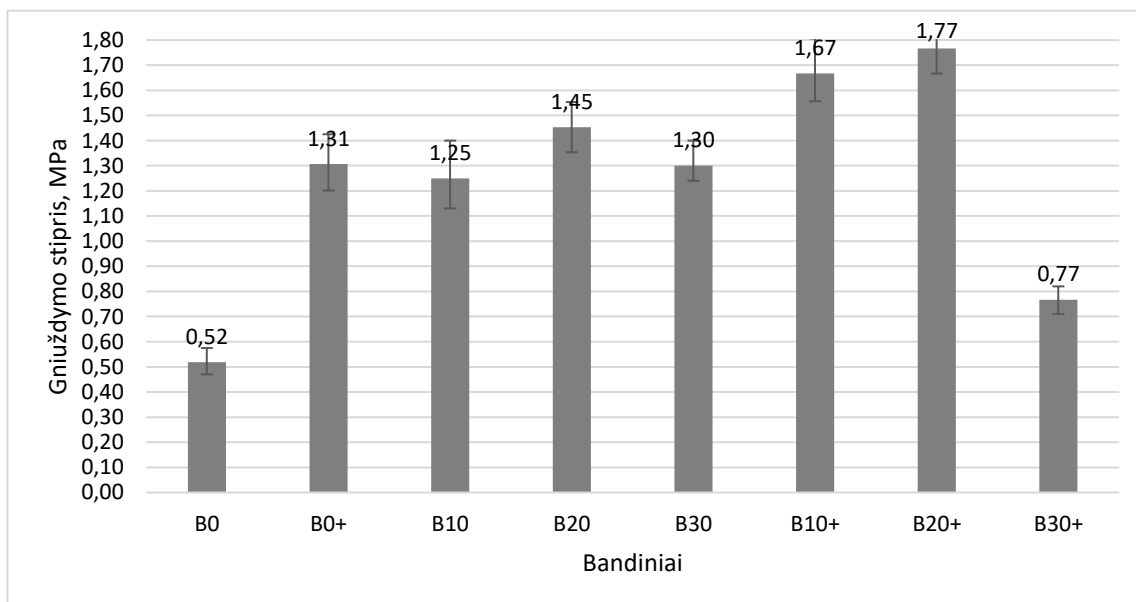
cm²/g [54], galima pastebėti, kad gysločio miltelių dalelės yra stambesnės, nes mažesnis specifinis paviršiaus plotas rodo didesnę dalelių dydį.

3.6. Bandinių gniuždymo stiprio rezultatai

Pagal turimą plotą ir gautą gniuždymo jėgą, pagal 7 formulę apskaičiuojamas gniuždymo stipris. Tikslesniems rezultatams nustatyti, iš kiekvieno mišinio atrenkami trys kubelio formos mėginiai. Atlikti tankio, gniuždomojo stiprio matavimai (žr. 24, 25 pav.) po 28 dienų pateikiami 1 priede.



24 pav. Bandinių tankio nustatymo rezultatai



25 pav. Bandinių gniuždymo stiprio rezultatai

Atlikus prizmės formos 200×50×50 mm bandinių tankio ir gniuždomojo stiprio tyrimus, nustatyta, kad bandinių savybės priklauso nuo jų sudėties ir paruošimo sąlygų. Supjaustyti 50×50×50 mm kubeliai po papildomo džiovavimo bei kaitinimo 50 °C temperatūroje 24 val. pasižymėjo skirtingu tankiu, svyruojančiu nuo 1310 iki 1700 kg/m³. Didžiausias tankis buvo užfiksuotas bandiniuose B0+ (vidutiniškai apie 1584,87 kg/m³), o mažiausias – B20+ bandiniuose (vidutiniškai apie 1323,32 kg/m³). Tai rodo mišinio struktūros ir sudėties įtaką medžiagos tankiui.

Gniuždymo stiprio bandymų rezultatai po 28 parų parodė, kad bandinių stipris tiesiogiai koreliuoja su jų tankiu ir mišinio sudėtimi. Mažiausias gniuždymo stipris gautas B0 serijoje (vidutiniškai apie 0,52 MPa), o didžiausias – B20+ bandiniuose (vidutiniškai apie 1,77 MPa). Didesnį stiprį parodė modifikuoti bandiniai, žymimi „+“, todėl galima teigti, jog papildomos priemonės pagerino medžiagos vidinę struktūrą ir atsparumą gniuždymui. Taip pat galima daryti išvadą, kad tankis ir gniuždymo stipris neturi sąsajų ir nepriklauso vienas nuo kito.

3.7. Mechaninio gysločio miltelių sumaišytų su vandeniu atsparumo testo rezultatai

Atliktas vandens ir gysločio mišinio bandinių gniuždymo stiprio tyrimas siekiant įvertinti, ar pats gysločio komponentas gali suteikti mišiniui mechaninį stiprį. Gniuždomasis stipris nustatytas taikant identiškus bandymo parametrus, naudojamus 50×50×50 mm kubelių gniuždymo bandymuose, tačiau šiuo atveju bandiniai buvo cilindrinės formos. Tyrimo rezultatai parodė, kad vandens ir gysločio mišinio bandiniai pasižymi tam tikru gniuždomuoju stipriu, kurio reikšmės pateiktos 10 lentelėje.

10 lentelė. Gysločio miltelių ir vandens mišinio bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas

Duomenys Bandiniai	Masė m, g	Bandinio diametras d, mm	Bandinio aukštis h, mm	Gniuždomoji jėga, kN	S_{pav}, mm²	Gniuždymo stipris, MPa
1	7,80	19,99	24,31	4,58	313,85	14,59
2	8,00	20,10	25,03	3,31	317,31	10,43

Atlikus vandens ir gysločio miltelių mišinio bandinių gniuždymo stiprio tyrimą nustatyta, kad šis mišinys pasižymi reikšmingu mechaniniu atsparumu. Apskaičiuotos gniuždymo stiprio reikšmės – 14,6 MPa ir 10,4 MPa – rodo, kad vien tik iš vandens ir gysločio sudarytas biokompozitas formuoja tvirtą, mechaniškai laikantį darinį. Nors gautas stipris vis dar mažesnis nei tradicinių cementinių (apie 30 MPa) pėsčiųjų tako dangų, gauti rezultatai rodo, kad gysločio milteliai gali atlikti rišiklio vaidmenį bei prisidėti prie vandeniui laidžios dangos biokompozito stiprumo.



26 pav. Gyslotis + vanduo mišinio bandinys po sugniuždymo

3.8. Vandens pralaidumo bandymo rezultatai

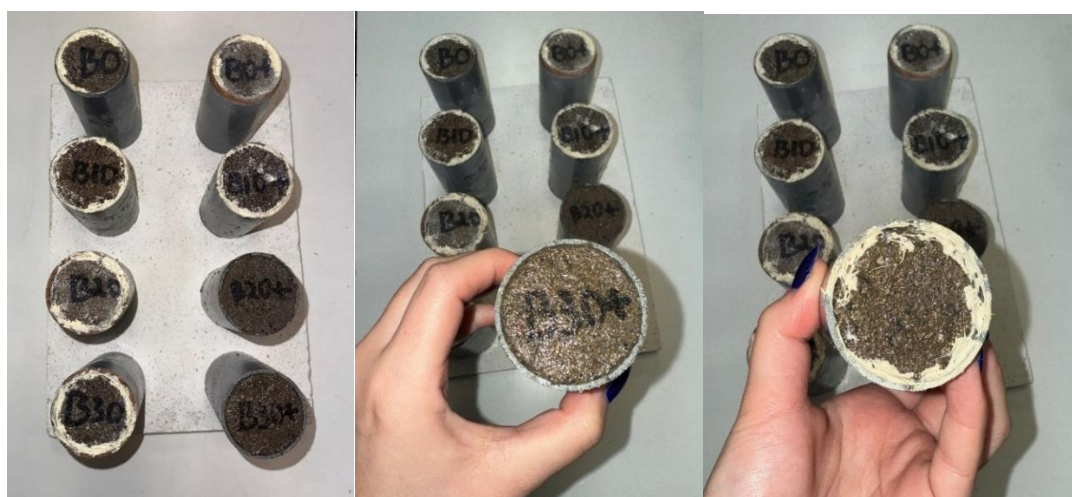
Buvo atlikti vandens pralaidumo bandymai, kurių metu kiekvieno bandinio vandens pralaidumas buvo matuojamas du kartus po 5 minutes, siekiant užtikrinti rezultatų patikimumą (žr. 2 priedą). Bandymo metu buvo registruojamas laikas ir surenkamo vandens tūris, pagal kurį apskaičiuotas vandens debitas. Prieš bandymą visi bandiniai buvo pasverti siekiant nustatyti jų pradinę masę, o po

bandymo – pakartotinai pasverti, kad būtų galima įvertinti bandinių vandens įgeriamumą. Šiame tyrime vertinamas tik vertikalusis vandens pralaidumas, nes jo reikšmės paprastai yra mažesnės nei horizontalaus pralaidumo, todėl šis parametras laikomas labiau ribojančiu ir jautresniu medžiagos struktūros pokyčiams rodikliu. Visi skaičiavimo rezultatai pateikiami 11 lentelėje.

11 lentelė. Vandens debito ir vertikalaus vandens pralaidumo nustatymas

Duomenys Bandinys	Vid. $m_2 - m_1$, g	t, s	Vid. Q_v , m^3/s	l, m	h, m	D, m	Vid. K_v , m/s
B0	213,33	300	$7,11 \times 10^{-7}$	0,1	0,28	0,045	0,0001597
B0+	418,22	300	$1,39 \times 10^{-6}$	0,1	0,28	0,045	0,0003130
B10	606,80	300	$2,02 \times 10^{-6}$	0,1	0,28	0,045	0,0004542
B20	402,82	300	$1,34 \times 10^{-6}$	0,1	0,28	0,045	0,0003015
B30	64,89	300	$2,16 \times 10^{-7}$	0,1	0,28	0,045	0,0000486
B10+	177,50	300	$5,92 \times 10^{-7}$	0,1	0,28	0,045	0,0001329
B20+	10,26	300	$3,42 \times 10^{-8}$	0,1	0,28	0,045	0,0000077
B30+	4,45	300	$1,48 \times 10^{-8}$	0,1	0,28	0,045	0,0000033

Galima daryti išvadą, kad visiškai nelaidūs vandeniui tapo B20+ ir B30+ mišinio bandiniai, kurių vidurkinės $K_v = 0,77 \times 10^{-5}$ m/s ir $K_v = 0,33 \times 10^{-5}$ m/s, o tai yra mažiau už deklaruojamą K_v vertę $1,0 \times 10^{-5}$ m/s [55]. Šis reiškinys gali būti siejamas su pelenų ir *SikaControl® E-150* emulsijos naudojimu mišiniuose, kuri ne tik padidina mechaninį stiprumą, bet ir ženkliai sumažina vandens pralaidumą. Geriausiai vandenį praleido B0+, B10 mišinio bandiniai (atitinkamai vidurkinės K_v reikšmės – $3,1,3 \times 10^{-4}$ m/s, $4,54 \times 10^{-4}$ m/s). Po atlikto bandymo, t.y. po 15 minučių nepertraukiamo vandens tiekimo, bandiniai išlaikė savo struktūrinį vientisumą – jie nesuiro, nesutrūko ir nesuminkštėjo, kaip būtų galima tikėtis veikiant nepertraukiamai vandens srovei (žr. 27 pav.).



27 pav. Vizualinė bandinių analizė po vandens pralaidumo bandymo

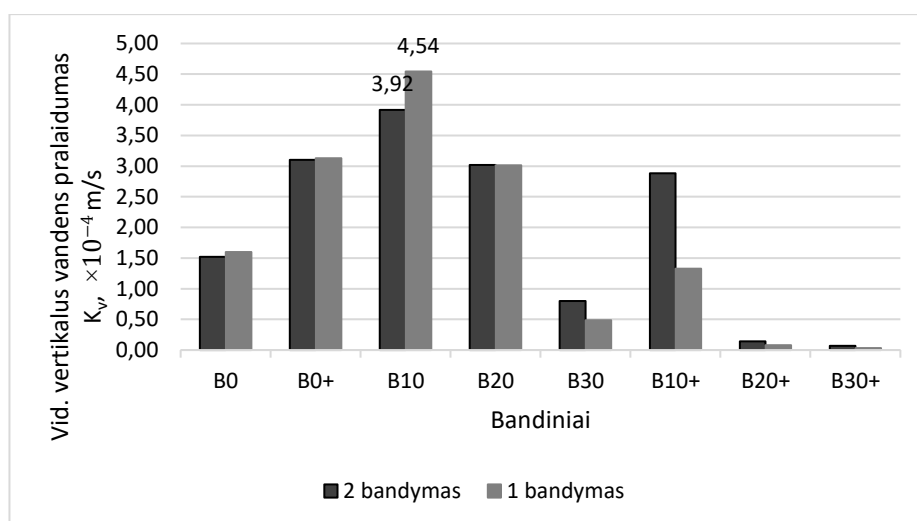
Bandymas buvo pakartotas po 7 dienų, siekiant imituoti eksploatacines sąlygas, kuriose vienas vandens pralaidumo tyrimas atitiktų lietingą dieną. Pakartotinam bandymui buvo naudojami tie patys bandiniai kaip ir pradiniam tyrime, siekiant nustatyti geriausią vandens pralaidumo rezultatą. Šio

bandymo tikslas – įvertinti, ar pakartotinai veikiami vandens bandiniai deformuojasi, minkštėja arba keičia vandens pralaidumo savybes. Pakartotinio tyrimo rezultatai pateikiami 12 lentelėje.

12 lentelė. Pakartotinis vandens debito ir vertikalaus vandens pralaidumo nustatymas

Duomenys Bandinys	Vid. m_2-m_1 , g	t, s	Vid. Q_v , m^3/s	l, m	h, m	D, m	Vid. K_v , m/s
B0	203.22	300	$6,77 \times 10^{-7}$	0,1	0,28	0,045	0,0001521
B0+	414.38	300	$1,38 \times 10^{-6}$	0,1	0,28	0,045	0,0003102
B10	523.41	300	$1,74 \times 10^{-6}$	0,1	0,28	0,045	0,0003918
B20	403.52	300	$1,35 \times 10^{-6}$	0,1	0,28	0,045	0,0003020
B30	106.91	300	$3,56 \times 10^{-7}$	0,1	0,28	0,045	0,0000800
B10+	385.34	300	$1,28 \times 10^{-6}$	0,1	0,28	0,045	0,0002884
B20+	19.12	300	$6,37 \times 10^{-8}$	0,1	0,28	0,045	0,0000143
B30+	9.05	300	$3,02 \times 10^{-8}$	0,1	0,28	0,045	0,0000068

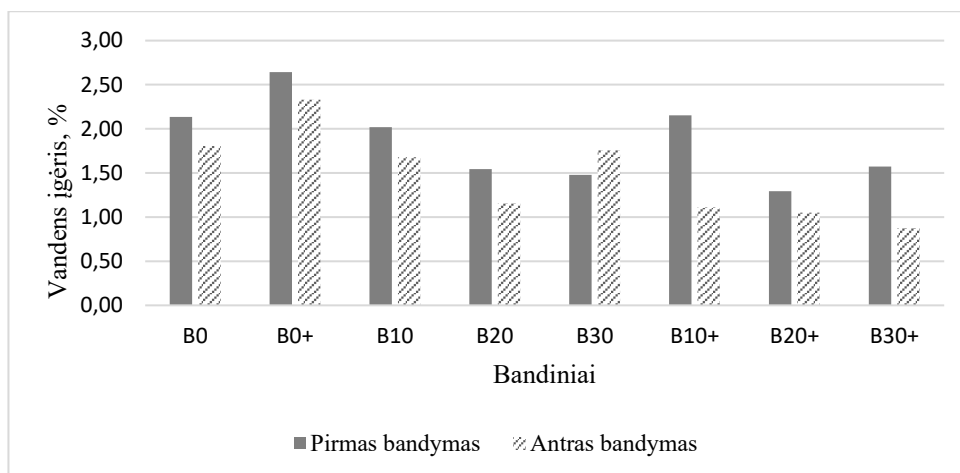
Pakartotinio tyrimo metu beveik visi bandiniai įgijo didesnės vandens pralaidumo reikšmes. Bandinys B10, kaip ir pirmajame vandens pralaidumo tyrime, pasižymėjo didžiausiu vertikaliuoju vandens pralaidumu – vid. $K_v = 3,92 \times 10^{-4}$ m/s. Bandinių B20 ir B30 vertikalojo pralaidumo koeficientai buvo reikšmingai mažesni už B10, o tai rodo, kad skirtingas kiekis pelenų įmaišymo sumažina poringumą ir vandens migracijos greitį. Mažiausią vandens pralaidumą turėjo B30+ mišinio bandinys, kurio vid. $K_v = 0,68 \times 10^{-5}$ m/s. Galima teigti, kad B30 bandinys yra vandeniui nepralaidus, nes jo vid. K_v reikšmė yra mažesnė už $1,0 \times 10^{-5}$ m/s deklaruojamą reikšmę [55]. Abu tyrimai patvirtina tą pačią bendrą priklausomybę – bandinių vandens pralaidumas mažėja didėjant priedo kiekiui (žr. 28 pav.).



28 pav. Koreliacija tarp dviejų vandens pralaidumo bandymų

Remiantis atliktais bandymais nustatyta, kad bandinių vandens įgėrimo rodikliai skyrėsi priklausomai nuo mišinio sudėties (žr. 3 priedą). Didžiausias vandens įgėris užfiksuotas B0+ bandinyje – vidutiniškai 2,49 %, o mažiausias – B20+ bandinyje, kurio vidutinis vandens įgėris siekė 1,17 % (žr. 29 pav.). Didžiausio bandinio vandens įgėrio reikšmė 2,5 % sąlyginai yra maža palyginti su molio

vandens įgėrio reikšmė, kuri būna apie 20 % ar porėto betono, kuri būna apie 10 %. Papildomai pastebėta, kad modifikuoti B20 ir B30+ bandiniai taip pat pasižymėjo nedideliu vandens įgėrimu. Tikėtina, kad sumažėjusiam šių mišinių vandens įgėrimui įtakos turėjo *SikaControl® E-150* emulsijos naudojimas, galimai sumažinęs betono poringumą. Atsižvelgiant į nustatytus mažus vandens įgėrimo kiekius, galima daryti prielaidą, kad eksploatacinėmis sąlygomis šie bandiniai išliks stabilūs ir nepatirs struktūrinių pažeidimų dėl vandens poveikio.



29 pav. Vandens įgėrimo kiekis

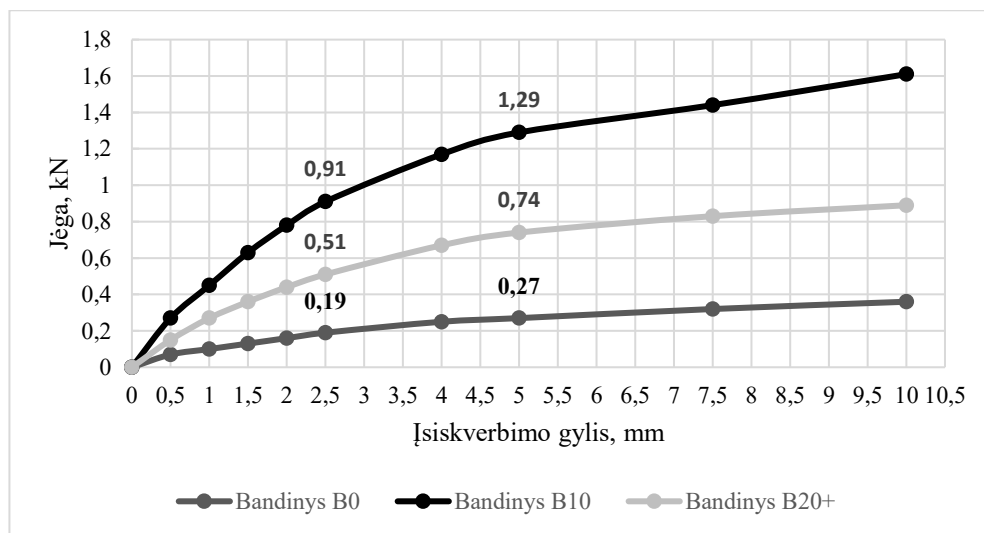
3.9. Laikomosios gebos Kalifornijos rodiklio nustatymo rezultatai

Atliktas bandinių laikomosios gebos įvertinimas, taikant Kalifornijos santykinio atsparumo (CBR) bandymo metodiką. Atliekant B10 bandinio tyrimą, pradinės atskaitos įsiskverbimo gylis sudarė 23 mm, B20+ bandinio – 22 mm, o B0 bandinio – 23 mm. Bandiniai presuoti identiška metodika kaip ir ankstesniuose eksperimentuose. CBR bandymas buvo atliktas praėjus 10 dienų nuo bandinių suformavimo. Gauti rezultatai pateikiami 13 lentelėje ir 4 priede. Gauti CBR bandinių rezultatai rodo, kad tyrime tirtų mišinių skaičiuojamos vertės yra nedidelės ir šiek tiek mažesnės už literatūroje nurodomą orientacinę ribą pėsčiųjų takams – 10 %. Tikslios reikalaujamos vertės negalima patvirtinti oficialiu dokumentu, todėl pateikti rezultatai vertintini kaip palyginamieji tarp bandinių, o ne kaip nustatyta norma. Analizuojant 13 lentelėje pateiktus duomenis, didžiausias atsparumas įsiskverbimui nustatytas B10 bandinyje – 2,5 mm gylis įsiskverbimui atitinka 6,89 %, o 5 mm – 6,45 %. Tuo tarpu kontrolinis bandinys B0 ir labiausiai modifikuotas B20+ mišinio bandinys pasižymi mažesnėmis CBR vertėmis, atitinkamai nuo 1,35 – 1,44 % (B0) ir 3,70 – 3,86 % (B20+).

13 lentelė. CBR apskaičiavimas

Duomenys Bandinys	Įsiskverbimo gylis, mm	Jėga F, kN	Referencinė jėga F _{ref} , kN	CBR, %
B0	2,5	0,19	13,20	1,44
	5,0	0,27	20,00	1,35
B10	2,5	0,91	13,20	6,89
	5,0	1,29	20,00	6,45
B20+	2,5	0,51	13,20	3,86
	5,0	0,74	20,00	3,70

Visuose grafikuose matyti, kad didėjant apkrovai įsiskverbimo gylis palaipsniui auga. 30 paveikslėlyje pateikta B0, B10 ir B20+ bandinių įsiskverbimo gylio priklausomybė nuo veikiančios jėgos. Pradinėje apkrovos stadijoje įsiskverbimo gylio kitimas pastebimas nedidelis, tačiau vėliau stebimas tolygesnis padidėjimas, rodantis laipsnišką paviršiaus struktūros deformaciją. Esant 2,5 mm įsiskverbimo gyliui, B0 bandinyje užfiksuota 0,19 kN jėga, o 5 mm gylyje – 0,27 kN apkrova. B10 bandinio didesnės apkrovų reikšmės galėjo būti dėl mišinio sudėties – mišinyje 0/2 fr. atsijas keitė 10 % komunalinių pelenų, kas galėjo lemti padidėjusį paviršiaus kietumą ir atsparumą įspaudimui. B20+ bandinio įsiskverbimo gylių apkrovų reikšmės yra vidutinės, todėl galima teigti, kad didesnis kiekis pelenų arba emulsijos pridėjimas sukelia mažesnę paviršiaus kietumą.



30 pav. B0, B10 ir B20+ bandinio įsiskverbimo gylio ir jėgos priklausomybė

Galima daryti išvadą, kad mišinio sudėtis ir priedų kiekis daro tiesioginę įtaką CBR vertėms, tačiau net optimizuotas B10 mišinys neišlaiko literatūrinės orientacinės ribos. Tikėtina, kad sąlyginai mažos vertės gautos dėl bandymo metu dar nespėjusių pilnai išdžiūti bandinių. Šią prielaidą patvirtina minėtų bandinių gauti dideli gniuždymo stipriai – B0 bandinys – 0,52 MPa, B10 bandinys – 1,52 MPa ir B20+ bandinys – 1,77 MPa. Siekiant įvertinti, kokios CBR reikšmės būtų buvusios visiškai sausiems bandiniams, buvo atliktas perskaičiavimas remiantis empirinėmis priklausomybėmis tarp gniuždymo stiprio, CBR ir E_{v2} modulių. Pagal šią priklausomybę buvo nustatyta, kad tik B20+ bandinys pasiekė pėsčiųjų takų pagrindui reikaujama E_{v2} – 120 MPa vertę. Todėl daroma išvada, kad B20+ mišinio struktūrinės savybės yra pakankamos pėsčiųjų takų apkrovoms, o kitų tipų mišiniams būtina atlikti sutankinimo ar sudėties korekcijas.

3.10. Atsparumo UV spinduliuotės poveikiui nustatymo rezultatai

Atlikus UV spinduliuotės poveikio tyrimą, kurio metu bandiniai 10 parų buvo laikomi UV spintoje, o tai pagal taikomą pagreitinto senėjimo ekvivalentą atitinka maždaug 9,6 mėnesio natūralaus saulės poveikio, nebuvo nustatyta jokių vizualiai pastebimų paviršiaus pažeidimų (žr. 31 – 34 pav.). Nuotraukose matomos raidės atitinka šiuos bandinius: J – B0, S – B0+, L – B10, N – B20, I – B30, O – B10+, K – B20+, E – B30+.



31 pav. Bandiniai prieš atsparumo UV spinduliuotei tyrimą: sudėtis B0, B0+, B10, B20



32 pav. Bandiniai po atsparumo UV spinduliuotei tyrimo (10 parų): sudėtis B0, B0+, B10, B20



33 pav. Bandiniai prieš atsparumo UV spinduliuotei tyrimą: sudėtis B30, B10+, B20+, B30+



34 pav. Bandiniai po atsparumo UV spinduliuotei tyrimo (10 parų): sudėtis B30, B10+, B20+, B30+

Remiantis rezultatais galima teigti, kad ultravioletinės spinduliuotės poveikis neturi reikšmingo neigiamo efekto tiriamo biokompozito struktūrai ar paviršiaus savybėms.

3.11. Medžiagų šalčio atsparumo tyrimo rezultatai

Atlikus 30 užšaldymo–atšaldymo ciklą, kurie atitinka apie 2 metus eksploatavimo sąlygas, įvertinta bandinių būklė per tūrinį padidėjimą, pateikiama 14 lentelėje. Taip pat atliktas vizualinis bandinių palyginimas (žr. 35 – 42 pav.).

14 lentelė. Atsparumo šalčiui tyrimo rezultatai

Duomenys Bandinys	Masės pokytis, %
B0	1,09
B0+	0,75
B10	1,03
B20	2,67
B30	3,29
B10+	1,96
B20+	0,87
B30+	0,82

Mažiausias masės nuostolis pasiektas B0+, B20+, B30+ ir B10 bandiniuose, atitinkamai 0,75 %, 0,87 %, 0,82 % ir 1,03 %. Šie bandiniai patyrė mažiausią masės pokytį, todėl laikomi labiausiai atsparūs šalčiui. Silpniausi rezultatai pasiekti B20, B30 bandinių, atitinkamai 2,67 % ir 3,29 %. Bandiniai patyrė didžiausią masės nuostolį, o šios vertės galėjo atsirasti dėl didesnio poringumo dėl į bandinių sudėtis dėto didesnio komunalinių pelenų kiekio.



a) prieš

b) po

35 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B0



a) prieš

b) po

36 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B0+



a) prieš



b) po

37 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B10



a) prieš



b) po

38 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B20



a) prieš



b) po

39 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B30



a) prieš



b) po

40 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B10+



a) prieš



b) po

41 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B20+

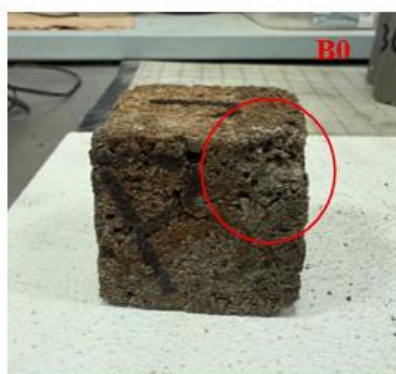


a) prieš

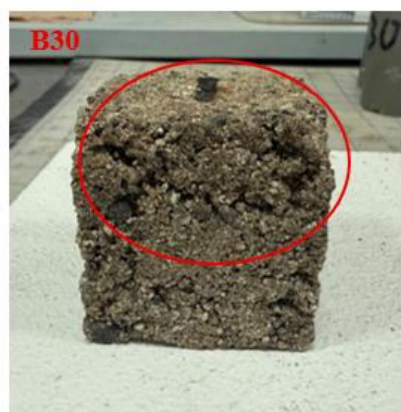
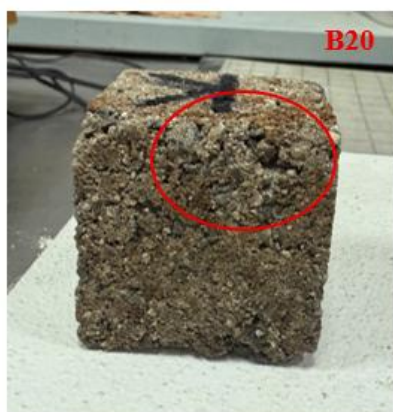
b) po

42 pav. Bandiniai prieš ir po šalčio tyrimo: sudėtis B30+

Po atlikto vizualinio bandinių palyginimo galima matyti, kad visų bandinių paviršius šiek tiek pakeitė spalvą ir tapo šviesesnis. Tačiau didžiausi vizualiniai skirtumai pastebimi B0, B0+, B20, B30 bandiniuose, kuriuose matosi paviršiaus irimo požymiai – stiprūs nutrupėjimai ir įtrūkimai (žr. 43, 44 pav.).



43 pav. Bandiniai po atsparumo šalčiui tyrimo



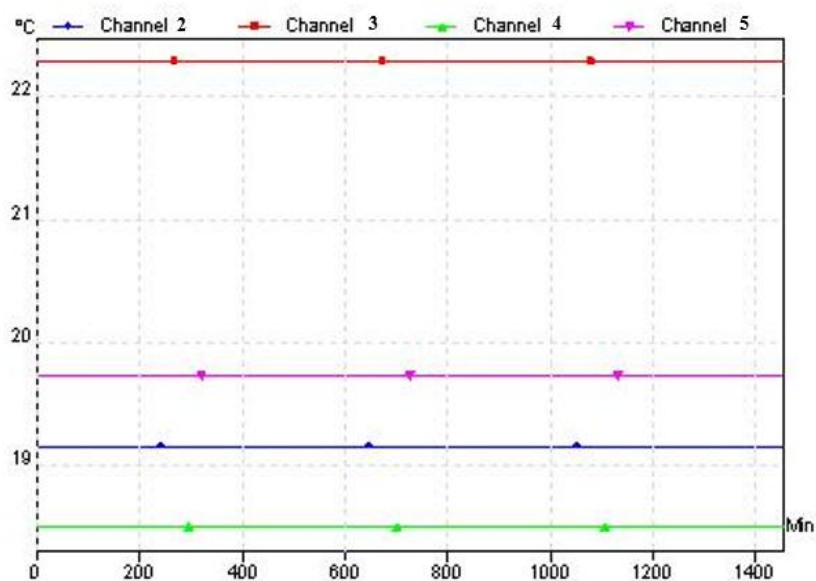
44 pav. Bandiniai po atsparumo šalčiui tyrimo

Galima daryti išvadą, kad atspariausi šalčiui yra bandinių variantai su „+“, o mažiausią atsparumą šalčiui turi B20 ir B30 sudėtys dėl galimo didesnio poringumo ir struktūrinio pažeidimo. Dėl šios priežasties pėsčiųjų tako dangai turėtų būti naudojami šių sudėčių bandiniai: B10, B20+ ir B30+.

3.12. Gysločio miltelių ir komunalinių pelenų hidratacijos tyrimo pusiau adiabatiniu kalorimetrijos metodo rezultatai

Pusiau adiabatinės kalorimetrijos bandymo metu buvo analizuojama gysločio ir komunalinių pelenų įtaka mišinio tešlos rišimosi trukmei ir temperatūros kitimui. Tyrimui atlikti maišomos 4 skirtingos

sudėtys (B0, B10, B20, B30), nevertinant skirtingų frakcijų atsijų, kuriuos neturi reikšmės šiame tyrime. Po 24 val. atlikti rezultatai pateikiami 45 paveikslėlyje.



45 pav. Pusiau adiabatinio kalorimetrijos metodo rezultatai

Pusiau adiabatinės kalorimetrijos bandymo duomenys rodo, kad gysločio miltelių ir komunalinių pelenų įmaišymas į mišinio teslą neturėjo reikšmingos įtakos šilumos išsiskyrimui per pirmąsias 24 hidratacijos valandas. Tai leidžia teigti, kad priedų hidratacinis aktyvumas šiomis sąlygomis nepasireiškia.

Atlikus visus tyrimus analizuojama, kuris bandinys buvo geriausias ilgaamžiškumo tyrimų atžvilgiu nustatant vandeniui laidžią dangą. Duomenys pateikiami 15 lentelėje.

15 lentelė. Atliktų tyrimų analizė

Duomenys Bandinys	Gniuždymo stipris (MPa)	Vid. vandens pralaidumas K_v (m/s)	CBR $\rightarrow E_{v2}$	Atsparumas šalčiui (masės pokytis, %)	UV atsparumas
B0	0,52	$3,12 \times 10^{-4}$	70 MPa	1,09	geras
B0+	1,31	$6,23 \times 10^{-4}$	–	0,75	geras
B10	1,25	$8,46 \times 10^{-4}$	90 MPa	1,03	geras
B20	1,45	$6,04 \times 10^{-4}$	–	2,67	geras
B30	1,30	$1,29 \times 10^{-4}$	–	3,29	geras
B10+	1,67	$4,21 \times 10^{-4}$	–	1,96	geras
B20+	1,77	$2,20 \times 10^{-5}$	120 MPa	0,87	geras
B30+	0,77	$1,00 \times 10^{-5}$	–	0,82	geras

Apibendrinant galima teigti, kad neatsižvelgiant į vandens pralaidumo rodiklį, geriausias bandinys ilgaamžiškumo požiūriu yra B20+, nes jis pasižymi didžiausiu gniuždymo stipriu (1,77 MPa), aukšta CBR $\rightarrow E_{v2}$ reikšme (120 MPa) bei nedideliu masės pokyčiu po atsparumo šalčiui bandymų (0,87 %), lyginant su kitais bandiniais (žr. 15 lentelę). Tačiau, kadangi baigiamajame magistro projekte

vertinama vandeniui laidī danga, įvertinus visus ilgaamžiškumo tyrimų rezultatus ir vandens pralaidumo rodiklius, tinkamiausia sudėtis yra biokompozitas su 10 % komunalinių pelenų (B10), kuris pasižymi didžiausiu vidutiniu vandens pralaidumu ($8,46 \times 10^{-4}$ m/s). Šiame bandinyje dėl organinių medžiagų atsiradusios rūgštinės terpės gali pradėti kauptis pelėsis, todėl reikalingas sudėties modifikavimas. Pavyzdžiui, į mišinio sudėtį įmaišant kalkių, kurios šarmintų terpę ir neleistų pelėsiui atsirasti.

Rekomenduojama tirtą pėsčiųjų tako dangą naudoti pėsčiųjų takams po pastatų stogeliais, dengtoms terasoms, dviračių sandėlių grindims, sporto maniežams, sodo takeliams. Taip pat geriausia, jei ši danga bus eksploatuojama šalyse, kurių metinė vidutinė žemiausia oro temperatūra sausį yra ne mažesnė nei 5 °C (Portugalija, Malta, Italija ir t.t.). Rekomenduojama, kad pėsčiųjų takas turėtų konstrukcinius bortus, kurie neleistų takui deformuotis bei saugotų nuo struktūrinio irimo eksploatacijos metu.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę apie vandeniui laidžias dangas suprojektuota biokompozito sudėtis, kurią sudaro 5 % gysločio miltelių ir skirtingas kiekis (10 %, 20 %, 30 %) komunalinių atliekų pelenų. Pusė bandinių buvo impregnuoti 0,3 % nuo mišinio masės *SikaControl® E-150* emulsija, siekiant pagerinti atsparumą vandeniui ir ilgaamžiškumą.
2. Ištirtos gysločio miltelių ir cemento cheminės savybės (SEM + EDS). Gysločio milteliai yra organinės, augalinės kilmės (38 % C, 58 % O), cementas – neorganinės, mineralinės kilmės medžiaga (50 % Ca, 33 % O).
3. Nustatytos pagaminto biokompozito fizikinės ir mechaninės savybės:
 - 3.1. nustatytas gysločio miltelių dalelių specifinis paviršiaus plotas S lygus $622,5 \text{ cm}^2/\text{g}$;
 - 3.2. didžiausias tankis gautas B0+ mišinio bandiniuose (vidutiniškai apie $1584,9 \text{ kg/m}^3$), mažiausias – B20+ bandiniuose (vidutiniškai apie $1323,3 \text{ kg/m}^3$). Didžiausias gniuždomasis stipris nustatytas B20+ mišinio bandiniuose (vidutiniškai apie 1,77 MPa), mažiausias – B0 bandiniuose (vidutiniškai apie 0,52 MPa);
 - 3.3. didžiausias gysločio miltelių ir vandens mišinio bandinio gniuždymo stipris lygus 14,59 MPa (antro bandinio – 10,43 MPa). Šis gniuždymo stipris yra mažesnis nei betono ar asfaltbetonio, tačiau pakankamai stiprus pėsčiųjų takų dangai;
 - 3.4. atlikus vertikaliojo vandens pralaidumo tyrimą nustatyta, kad geriausiai vandenį praleido B10 bandiniai (vid. vertikalios vandens pralaidumo koeficientas $K_v \approx 42,30 \times 10^{-5} \text{ m/s}$), blogiausiai – B30+ bandiniai ($K_v \approx 0,51 \times 10^{-5} \text{ m/s}$);
 - 3.5. nustačius CBR rodiklį ir priklausomybę nuo E_{v2} , aukščiausią E_{v2} reikšmę (120 MPa) turėjo B20+ bandinys, mažiausią (apie 70 MPa) – B0 bandinys;
 - 3.6. palaikius bandinius UV spintoje 10 parų paaiškėjo, kad visi bandiniai nepatyrė reikšmingų vizualinių pokyčių, nepakeitė spalvos ar formos, neatsirado pelėsio dėl organinių medžiagų pridėjimo;
 - 3.7. didžiausią atsparumą šalčiui pagal masės nuostolio rodiklį parodė B0+ bandinys (masės nuostolis apie 0,75 %, neužfiksuota ryškių vizualinių pažeidimų), prasčiausiai šalčiui atsparus tapo B30 bandinys (masės nuostolis apie 3,29 %, pastebėti įtrūkimai ir deformacijos);
 - 3.8. atlikus hidratacijos tyrimą pusiau adiabatinės kalorimetrijos metodu nustatyta, kad gysločio miltelių ir komunalinių pelenų įmaišymas į mišinio tešlą per pirmąsias 24 hidratacijos valandas nereikšmingai veikia šilumos išsiskyrimą, t. y. priedų hidratacinis aktyvumas šiomis sąlygomis nepasireiškia.
4. Įvertinus esminius mišinių komponentus nustatyta, kad gysločio milteliai, komunaliniai pelenai ir *SikaControl® E-150* emulsija reikšmingai keičia biokompozito struktūrą ir ilgaamžiškumą: modifikuoti mišiniai pasižymi didesniu gniuždomuoju stipriu, geresniu atsparumu šalčiui ir mažesniu vertikaliu vandens pralaidumu, o dalis sudėčių (B20+, B30+) tampa nelaidžios vandeniui. CBR bandymai parodė, kad optimalų atsparumo ir struktūrinių savybių derinį turi biokompozitas su 20 % komunalinių atliekų pelenais (B20+) ir apie 0,3 % *SikaControl® E-150* emulsija. Atsižvelgiant į vandens pralaidumo bandymą, B10 sudėtis rekomenduotina mažų apkrovų pėsčiųjų dangoms, ypač dalinai dengtose ar nuo tiesioginių atmosferos poveikių apsaugotose zonose, numatant konstrukcinius bortus dangos deformacijoms mažinti.

Literatūros sąrašas

1. HOSSAIN, Md Uzzal; NG, S. Thomas; ANTWI-AFARI, Prince ir AMOR, Ben. Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 130 (2020), pp. 109948. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120302392>.
2. MERLI, Roberto; PREZIOSI, Michele; ACAMPORA, Alessia; LUCCHETTI, Maria Claudia ir PETRUCCI, Elisabetta. Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 248 (2020), pp. 119207. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619340776>.
3. TIAN, Qiong; ZHOU, Ji; HOU, Jingwei; ZHOU, Zhiwu; LIANG, Ziming ir kt. Building the future: Smart concrete as a key element in next-generation construction. *Construction and Building Materials*, vol. 429 (2024), pp. 136364. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824015058>.
4. GÜÇLÜER, Kadir; ÖZBEYAZ, Abdurrahman; GÖYMEN, Samet ir GÜNAYDIN, Osman. A comparative investigation using machine learning methods for concrete compressive strength estimation. *Materials Today Communications*, vol. 27 (2021), pp. 102278. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492821002701>.
5. LATAWIEC, Rafal; WOYCIECHOWSKI, Piotr ir KOWALSKI, Karol. Sustainable Concrete Performance—CO₂-Emission. *Environments*, vol. 5 (2018), pp. 27.
6. CHEN, Yu; VEER, Frederic ir ÇOPUROĞLU, Oguzhan. A critical review of 3D concrete printing as a low CO₂ concrete approach. *Heron*, vol. 62 (2017), pp. 167–194.
7. DEL REY CASTILLO, Enrique; ALMESFER, Nasser; SAGGI, Opinder ir INGHAM, Jason M. Light-weight concrete with artificial aggregate manufactured from plastic waste. *Construction and Building Materials*, vol. 265 (2020), pp. 120199. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820322042>.
8. BEKKERI, Gopal; KIRAN, Shetty M. ir NAYAK, Gopinatha. Synthesis of artificial aggregates and their impact on performance of concrete: a review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 25 (2023).
9. MO, Kim Hung; THOMAS, Blessen Skariah; YAP, Soon Poh; ABUTAHA, Fuad ir TAN, Chee Ghuan. Viability of agricultural wastes as substitute of natural aggregate in concrete: A review on the durability-related properties. *Journal of Cleaner Production*, vol. 275 (2020), pp. 123062. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620331073>.
10. PRADHAN, Subhasis; TIWARI, B. R.; KUMAR, Shailendra ir BARAI, Sudhirkumar V. Comparative LCA of recycled and natural aggregate concrete using Particle Packing Method and conventional method of design mix. *Journal of Cleaner Production*, vol. 228 (2019), pp. 679–691. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619314258>.
11. VAIČIENĖ, Marija ir SIMANAVIČIUS, Elvinas. The Effect of Municipal Solid Waste Incineration Ash on the Properties and Durability of Cement Concrete. *Materials*, vol. 15 (2022), nr. 13.

12. MINANE, Jacques Rémy; BECQUART, Frédéric; ABRIAK, Nor Edine ir DEBOFFE, Christophe. Upgraded Mineral Sand Fraction from MSWI Bottom Ash: An Alternative Solution for the Substitution of Natural Aggregates in Concrete Applications. *Procedia Engineering*, vol. 180 (2017), pp. 1213–1220. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817317897>.
13. IRSHIDAT, Mohammad R.; AL-NUAIMI, Nasser ir RABIE, Mohamed. Potential utilization of municipal solid waste incineration ashes as sand replacement for developing sustainable cementitious binder. *Construction and Building Materials*, vol. 312 (2021), pp. 125488. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821032268>.
14. MARY JOSEPH, Aneeta; SNELLINGS, Ruben; NIELSEN, Peter; MATTHYS, Stijn ir DE BELIE, Nele. Pre-treatment and utilisation of municipal solid waste incineration bottom ashes towards a circular economy. *Construction and Building Materials*, vol. 260 (2020), pp. 120485. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820324909>.
15. BHOSALE, Avadhoot; ZADE, Nikhil P.; SARKAR, Pradip ir DAVIS, Robin. Mechanical and physical properties of cellular lightweight concrete block masonry. *Construction and Building Materials*, vol. 248 (2020), pp. 118621. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820306267>.
16. WANG, Qin; LI, Shi-yu; PAN, Shuo ir GUO, Zi-wei. Synthesis and properties of a silane and copolymer-modified graphene oxide for use as a water-reducing agent in cement pastes. *New Carbon Materials*, vol. 33 (2018), nr. 2, pp. 131–139. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872580518603300>.
17. GENG, Yongjuan; LI, Shaochun; HOU, Dongshuai; ZHANG, Weifeng; JIN, Zuquan ir kt. Fabrication of superhydrophobicity on foamed concrete surface by GO/silane coating. *Materials Letters*, vol. 265 (2020), pp. 127423. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X20301282>.
18. WANG, Rong; GAO, Peiwei; TIAN, Minghao ir DAI, Yuchen. Experimental study on mechanical and waterproof performance of lightweight foamed concrete mixed with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, vol. 209 (2019), pp. 655–664. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819306488>.
19. ALEROEVA, L. S.; MAGOMADOV, I. Z.; MAMASUROV, S. K.; MAMATSUEV, R. A.; APTAEV, Kh Kh ir kt. Materials used in the construction of roads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 905 (2020), nr. 1, pp. 012002. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/905/1/012002>.
20. Eurokodas 1. Poveikiai Konstrukcijoms. 2 Dalis. Tiltų Eismo Apkrovos / Lietuvos Standartizacijos Departamentas. 2004th Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006.
21. XIE, Ning; AKIN, Michelle ir SHI, Xianming. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, vol. 210 (2019), pp. 1605–1621. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618335376>.
22. VAITKUS, Audrius; ŠKULTECKĖ, Judita; VOROBOVAS, Viktoras; ŠERNAS, Ovidijus ir ŽALIMIENĖ, Laura. Cement Concrete Modular Pavement Implementation for Pedestrian and Bicycle Path. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 987 (2020), pp. 012002.

23. VAITKUS, Audrius; ANDRIEJAUSKAS, Tadas; ŠERNAS, Ovidijus; ČYGAS, Donatas ir LAURINAVIČIUS, Alfredas. Definition of concrete and composite precast concrete pavements texture. *Transport*, vol. 34 (2019), pp. 404–414.
24. SHA, Ai-min ir WEI, JIANG. Design Philosophy and Architecture of Eco-friendly Porous Pavement Materials. *China Journal of Highway and Transport*, vol. 31 (2018), nr. 9, pp. 1–6. Prieiga per: <https://zgglxb.chd.edu.cn/EN/Y2018/V31/I9/1>.
25. SHA, Aimin; LIU, Zhuangzhuang; JIANG, Wei; QI, Lin; HU, Liqun ir kt. Advances and development trends in eco-friendly pavements. *Journal of Road Engineering*, vol. 1 (2021), pp. 1–42. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2097049821000044>.
26. BENGAL, Shriram N.; PAMMAR, Leeladhar S. ir NAYAK, Chittaranjan B. Engineering application of organic materials with concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, vol. 56 (2022), pp. 581–586. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322010331>.
27. SHENOY, Amrutha D.; RAVINDRA, R. ir SATYANARAYANA, S. Effect of rain tree pod extract as plasticizer on properties of concrete. *Materials Today: Proceedings*, vol. 46 (2021), pp. 5182–5186. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321024949>.
28. OTERO, J.; CHAROLA, A. E. ir STARINIERI, V. Sticky rice–nanolime as a consolidation treatment for lime mortars. *Journal of Materials Science*, vol. 54 (2019), nr. 14, pp. 10217–10234. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03618-1>.
29. GONÇALVES, Filipa A. M. M.; SANTOS, Marta; CERNADAS, Teresa; ALVES, Patrícia ir FERREIRA, Paula. Influence of fillers on epoxy resins properties: a review. *Journal of Materials Science*, vol. 57 (2022), nr. 32, pp. 15183–15212. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07573-2>.
30. WANG, Xiaoqing; MA, Biao; CHEN, Shasha; WEI, Kun ir KANG, Xingxiang. Properties of epoxy-resin binders and feasibility of their application in pavement mixtures. *Construction and Building Materials*, vol. 295 (2021), pp. 123531. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821012915>.
31. XIANG, Qian ir XIAO, Feipeng. Applications of epoxy materials in pavement engineering. *Construction and Building Materials*, vol. 235 (2020), pp. 117529. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819329812>.
32. XIE, N.; WANG, H. ir FENG, D. 2 - Coating materials to increase pavement surface reflectance. In: *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs*, pp. 13–35F. Pacheco-Torgal; J. A. Labrincha; L. F. Cabeza ir C. -G Granqvist (eds.). Oxford: Woodhead Publishing, 2015. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423805000029>.
33. JIN, Fan-Long; LI, Xiang ir PARK, Soo-Jin. Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 29 (2015), pp. 1–11. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X15001033>.
34. ANAGNOSTOPOULOS, Costas A.; SAPIDIS, Giorgos ir PAPASTERGIADIS, Efthimios. Fundamental properties of epoxy resin-modified cement grouts. *Construction and Building Materials*, vol. 125 (2016), pp. 184–195. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816313137>.

35. ROJAS-SANDOVAL, Julissa. *Plantago major* (broad-leaved plantain). *CABI Compendium* (2022). Prieiga per: <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.41814>.
36. KARTINI, Kartini; WINARJO, Babtista; FITRIANI, Endang ir ISLAMIE, Ridho. Formulation and pH-Physical Stability Evaluation of Gel and Cream of *Plantago major* Leaves Extract. *Media Pharmaceutica Indonesiana (MPI)*, vol. 1 (2017), pp. 174.
37. ALIZADEH BEHBAHANI, Behrooz; TABATABAEI YAZDI, Farideh; SHAHIDI, Fakhri; HESARINEJAD, Mohammad Ali; MORTAZAVI, Seyed Ali ir kt. *Plantago major* seed mucilage: Optimization of extraction and some physicochemical and rheological aspects. *Carbohydrate Polymers*, vol. 155 (2017), pp. 68–77. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861716309936>.
38. BEUSHAUSEN, Hans; TORRENT, Roberto ir ALEXANDER, Mark G. Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. *Cement and Concrete Research*, vol. 119 (2019), pp. 11–20. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884618300541>.
39. ADOM, Muhammad Bahrain; TAHER, Muhammad; MUTALABISIN, Muhammad Fathiy; AMRI, Mohamad Shahreen; ABDUL KUDOS, Muhammad Badri ir kt. Chemical constituents and medical benefits of *Plantago major*. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, vol. 96 (2017), pp. 348–360. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0753332217322746>.
40. SANAWUNG, Wachilakorn; CHEEWAKET, Tieng; TANGCHIRAPAT, Weerachart ir JATURAPITAKKUL, Chai. Influence of Palm Oil Fuel Ash and W/B Ratios on Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Resistance of Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017 (2017), nr. 1, pp. 4927640. Prieiga per: <https://doi.org/10.1155/2017/4927640>.
41. MIM, Nusrat Jahan; MERAZ, Md Montaseer; ISLAM, Md Hamidul; NOROOZINEJAD FARSANGI, Ehsan; MEHEDI, Md Tanjid ir kt. Eco-friendly and cost-effective self-compacting concrete using waste banana leaf ash. *Journal of Building Engineering*, vol. 64 (2023), pp. 105581. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022201587X>.
42. MOMSHAD, Asif Mahmud; ISLAM, Md Hamidul; DATTA, Shuvo Dip; SOBUZ, Md Habibur Rahman; AAYAZ, Rahat ir kt. Assessing the engineering properties and environmental impact with explainable machine learning analysis of sustainable concrete utilizing waste banana leaf ash as a partial cement replacement. *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 24 (2025), pp. 100886. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790825000096>.
43. Sika Deutschland CH AG & Co KG. *SikaControl® E-150: Polymer Dispersion for Liquid-PROOF Concrete*. , 2025. Prieiga per: <https://deu.sika.com/dms/getdocument.get/79631d21-9c2f-4c76-86a5-67e3c5a356c5/sikacontrol-e-150.pdf>.
44. *Vanduo Betonui. Techniniai Vandens Ėminių Ėmimo, Bandymo Ir Tinkamumo Reikalavimai, Įskaitant Grąžinamą Iš Gamybos Betono Pramoneje Vandenį, Pakartotinai Naudojamą Betono Mišiniui Ruošti / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2003 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005.
45. Kauno technologijos universitetas. *SEM: Skenuojantis Elektroninis Mikroskopas - FEI Quanta 200 FEG*. [2020. Prieiga per: <https://apcis.ktu.edu/MMI/lt/site/katalogas?more=6737>. [žiūrėta 2025].
46. *Cemento Bandymų Metodai. 6 Dalis. Smulkumo Nustatymas / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2019 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.

47. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 3 Dalis. Bandinių Gniuždymo Stipris / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2019 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020.
48. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 4 Dalis. Gniuždymo Stipris. Bandymo Mašinų Techniniai Reikalavimai / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2025 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2025.
49. *Bituminiai Mišiniai. Bandymo Metodai. 19 Dalis. Bandinio Pralaidumas / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2020 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. *Nesurištieji Ir Hidrauliškai Surišti Mišiniai. 47 Dalis. Bandymo Metodas Laikomosios Gebos Kalifornijos Rodikliui, Tiesioginės Laikomosios Gebos Rodikliui Ir Linijiniam Išbrinkimui Nustatyti / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2022 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2022.
52. Atlas Weathering Testing Guidebook: Atlas Electric Devices Co. *Paint & coatings industry*, vol. 18 (2002), nr. 3, pp. 85.
53. *Užpildų Šiluminių Savybių Ir Atsparumo Atmosferos Poveikiams Nustatymo Metodai. 1 Dalis. Atsparumo Šildymui Ir Atšildymui Nustatymas / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2007 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
54. DUWA, Hamisi; CHENGULA, Duwa; JOSEPH, J.; Msambichaka ir MIDDENDORF, Bernhard. Synthetic Determination of Specific Density, Specific Surface Area and Particle Size Distribution of Cementitious Powder Materials. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, vol. 41 (2018), pp. 177–189.
55. Lietuvos respublikos susisiekimo ministras. *Dėl Automobilių Kelių Standartizuotų Dangų Konstrukcijų Projektavimo Taisyklių Patvirtinimo*. , -03-28, 2025. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/1139fbd10c1311f0a1c6f244a8c21f99?jfwid=>.

Priedai

1 Priedas. Kubelių tankio ir gniuždymo stiprio apskaičiavimas

1 lentelė. Kubelių duomenys ir tankis

Duomenys Bandinys		Masė m, g	Vid. ilgis a, mm	Vid. plotis b, mm	Vid. aukštis h, mm	Tūris V, mm ³	Tankis ρ , g/mm ³	Tankis ρ , kg/m ³
B0	1	184,25	50	50,2	50,1	125751,0	0,00147	1465,2
	2	166,1	48	49,3	49,4	116900,2	0,00142	1420,9
	3	202,4	49	49,9	49,8	121766,0	0,00166	1662,2
B0+	1	191,4	50	49,6	49,7	123256,0	0,00155	1552,9
	2	182,8	49	49,8	49,9	121766,0	0,00150	1501,2
	3	200	48	49,4	49,6	117611,5	0,00170	1700,5
B10	1	168,3	49,9	49,3	49,5	121773,5	0,00138	1382,1
	2	163,5	50	49,7	49,9	124001,5	0,00132	1318,5
	3	173,1	50	49,3	49,2	121278,0	0,00143	1427,3
B20	1	178,6	49,8	49,6	49,7	122763,0	0,00145	1454,8
	2	179,6	49,6	49,6	49,6	122023,9	0,00147	1471,8
	3	193,3	50	49,8	50,1	124749,0	0,00155	1549,5
B30	1	182,5	49,8	49,3	49,6	121774,9	0,00150	1498,7
	2	169,2	50	49,5	49,3	122017,5	0,00139	1386,7
	3	170,2	49,8	49,4	49,4	121529,9	0,00140	1400,5
B10+	1	171,6	49,9	50,2	50,1	125499,5	0,00137	1367,3
	2	177,1	49,9	49,1	49,5	121279,5	0,00146	1460,3
	3	173,9	50	50,3	50,1	126001,5	0,00138	1380,1
B20+	1	155,6	49,9	49,8	49,8	123754,0	0,00126	1257,3
	2	173,7	49,8	49,1	49,2	120302,9	0,00144	1443,9
	3	156,7	49,7	49,9	49,8	123505,5	0,00127	1268,8
B30+	1	187,1	49,8	49,2	49,1	120302,9	0,00156	1555,2
	2	187,4	49,8	49,6	49,7	122763,0	0,00153	1526,5
	3	171,5	49,9	49,1	49,3	120789,4	0,00142	1419,8

2 lentelė. Kubelių gniuždymo stipris po 28 dienų

Duomenys Bandinys		Pav. plotas S_{pav} , mm ²	Gniuždymo jėga, kN	Gniuždymo stipris, MPa
B0	1	2510	1,19	0,47
	2	2366,4	1,36	0,57
	3	2445,1	1,25	0,51
B0+	1	2480	2,98	1,20
	2	2440,2	3,16	1,29
	3	2371,2	3,38	1,43
B10	1	2460,1	2,99	1,22
	2	2485	2,82	1,13
	3	2465	3,44	1,40
B20	1	2470,1	3,59	1,45
	2	2460,2	3,97	1,61
	3	2490	3,23	1,30
B30	1	2455,1	3,05	1,24
	2	2475	3,12	1,26
	3	2460,1	3,44	1,40
B10+	1	2505	3,98	1,59
	2	2450,1	3,76	1,53
	3	2515	4,72	1,88
B20+	1	2485	4,31	1,73
	2	2445,2	4,94	2,02
	3	2480	3,85	1,55
B30+	1	2450,2	2,01	0,82
	2	2470,1	1,91	0,77
	3	2450,1	1,74	0,71

2 Priedas. Bandinių vandens debito ir vertikalios vandens pralaidumo nustatymas

1 lentelė. Vandens debito ir vertikalios vandens pralaidumo nustatymas

Duomenys Bandinys		$m_2 - m_1, g$	t, s	$Q, m^3/s$	l, m	h, m	D, m	$K, m/s$
B0	1	278,38	300	$9,28 \times 10^{-7}$	0,10	0,28	0,045	0,0002084
	2	148,26	300	$4,94 \times 10^{-7}$	0,10	0,28	0,045	0,0000621
B0+	1	485,05	300	$1,62 \times 10^{-6}$	0,10	0,28	0,045	0,0002033
	2	351,39	300	$1,17 \times 10^{-6}$	0,10	0,28	0,045	0,0001473
B10	1	869,38	300	$2,90 \times 10^{-6}$	0,10	0,28	0,045	0,0003644
	2	344,21	300	$1,15 \times 10^{-6}$	0,10	0,28	0,045	0,0002576
B20	1	438,10	300	$1,46 \times 10^{-6}$	0,10	0,28	0,045	0,0003279
	2	367,54	300	$1,23 \times 10^{-6}$	0,10	0,28	0,045	0,0002751
B30	1	72,25	300	$2,41 \times 10^{-7}$	0,10	0,28	0,045	0,0000541
	2	57,52	300	$1,92 \times 10^{-7}$	0,10	0,28	0,045	0,0000431
B10+	1	205,62	300	$6,85 \times 10^{-7}$	0,10	0,28	0,045	0,0000862
	2	149,38	300	$4,98 \times 10^{-7}$	0,10	0,28	0,045	0,0000626
B20+	1	14,01	300	$4,67 \times 10^{-8}$	0,10	0,28	0,045	0,0000059
	2	6,50	300	$2,17 \times 10^{-8}$	0,10	0,28	0,045	0,0000027
B30+	1	4,48	300	$1,49 \times 10^{-8}$	0,10	0,28	0,045	0,0000034
	2	4,41	300	$1,47 \times 10^{-8}$	0,10	0,28	0,045	0,0000018

3 Priedas. Bandinių vandens įgėrio apskaičiavimas

1 lentelė. Bandinių vandens įgėris po pirmo bandymo

Duomenys Bandinys	Bandinio masė prieš m, g	Bandinio masė po m, g	Vandens įgėris, g	Vandens įgėris, %
B0	326.5	333.6	7.1	2.13
B0+	303.4	311.6	8.2	2.64
B10	312.8	319.2	6.4	2.02
B20	308.2	313.0	4.8	1.54
B30	285.7	290.0	4.3	1.48
B10+	318.5	325.5	7.0	2.15
B20+	340.7	345.2	4.5	1.29
B30+	338.6	344.0	5.4	1.57

2 lentelė. Bandinių vandens įgėris po antro bandymo

Duomenys Bandinys	Sauso bandinio masė m, g	Šlapio bandinio masė m, g	Vandens įgėris, g	Vandens įgėris, %
B0	319.6	325.5	5.9	1.81
B0+	301.5	308.7	7.2	2.33
B10	316.7	322.1	5.4	1.68
B20	301.5	305.0	3.5	1.16
B30	279.0	284.0	5.0	1.76
B10+	312.5	316.0	3.5	1.11
B20+	329.5	333.0	3.5	1.05
B30+	328.5	331.4	2.9	0.88

4 Priedas. Bandinių CBR rodiklio apskaičiavimas

1 lentelė. Bandinių CBR rodiklio apskaičiavimas

Duomenys Bandinys	Išsiskverbimo gylis, mm	Jėga F, kg	Jėga F, kN	Referencinė jėga F_{ref}, kN	CBR, %
B0	0,5	7	0,07		
	1,0	10	0,10		
	1,5	13	0,13		
	2,0	16	0,16		
	2,5	19	0,19	13,20	1,44
	4,0	25	0,25		
	5,0	27	0,27	20,00	1,35
	7,5	32	0,32	20,00	1,60
	10	36	0,36	20,00	1,80
B10	0,5	27	0,27		
	1,0	45	0,45		
	1,5	63	0,63		
	2,0	78	0,78		
	2,5	91	0,91	13,20	6,89
	4,0	117	1,17		
	5,0	129	1,29	20,00	6,45
	7,5	144	1,44	20,00	7,20
	10	161	1,61	20,00	8,05
B20+	0,5	15	0,15		
	1,0	27	0,27		
	1,5	36	0,36		
	2,0	44	0,44		
	2,5	51	0,51	13,20	3,86
	4,0	67	0,67		
	5,0	74	0,74	20,00	3,70
	7,5	83	0,83	20,00	4,15
	10	89	0,89	20,00	4,45