



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Stiklo duženų, išskirtų iš komunalinių atliekų srauto,
panaudojimas gaminant dirbtinį užpildą**

Baigiamasis magistro projektas

Aivaras Rimgaila

Projekto autorius

Doc. Dr. Evaldas Šerelis

Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Stiklo duženų, išskirtų iš komunalinių atliekų srauto,
panaudojimas gaminant dirbtinį užpildą**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Aivaras Rimgaila

Projekto autorius

Doc. Dr. Evaldas Šerelis

Vadovas

Prof. Dr. Vitoldas Vaitkevičius

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Aivaras Rimgaila

Stiklo duženų, išskirtų iš komunalinių atliekų srauto, panaudojimas gaminant dirbtinį užpildą

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, neiviena 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.

Aivaras Rimgaila



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: 6211EX008 Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija

Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):

Stiklo duženų išskirtų iš komunalinių atliekų srauto panaudojimas gaminant dirbtinį užpildą.

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.: V25-09-28

(lietuvių k.): Stiklo Duženų Išskirtų Iš Komunalinių Atliekų Srauto Panaudojimas Gaminant Dirbtinį Užpildą.

(anglų k.): Glass shards Obtained from Municipal Solid Waste Utilization in the Production of Artificial Aggregate.


Pradiniai duomenys darbui:

Baigiamojo projekto dalys:


	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	x
Analitiniai tyrimai	
Skaitiniai tyrimai	
Ekonominė dalis	
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį):

Vadovas:
(indėlis 100 %)

Lekt. Dr. Evaldas Šerelis 
pareigos, vardas, pavardė

Studentas:

Aivaras Rimgaila 
vardas, pavardė

Rimgaila, Aivaras. Stiklo duženų išskirtų iš komunalinių atliekų srauto panaudojimas gaminant dirbtinį užpildą. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. Dr. Evaldas Šerelis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: komunalinių atliekų stiklas, dirbtiniai užpildai, granuliavimas, rišikliai, stipris gniuždant, CO₂ dujos.

Kaunas, 2024. 58 p.

Santrauka

Baigiamajame projekte yra naudojamas cementas, hidraulinės kalkės ir perdirbamas komunalinių atliekų srauto stiklas taip pagaminant dirbtinius užpildus. Užpildų gamybai naudojamas diskinis granulatorius. Gauti dirbtiniai užpildai bandomi įvairiais metodais, nustatomos užpildų savybės ir ekologiskumo parametrai. Užpildai palyginami vieni su kitais ir ieškoma optimaliausia užpildo sudėtis.

Magistro baigiamasis projektas susideda iš trijų dalių: literatūros analizės, naudojamų medžiagų ir metodų apžvalgos, bei rezultatų aprašymo. Literatūros analizės dalyje apžvelgiamas statybų poveikis aplinkai, stiklo kaip dirbtinio užpildo sudedamosios dalies panaudojimas, stiklo kaip pucolaninio priedo tinkamumas, bei šarminės korozijos rizika, taip pat aptariami įvairūs granuliavimo būdai, bei dirbtinio užpildo kietinimo būdai. Metodų ir medžiagų apžvalgoje yra aprašomi bandymai, kurie buvo naudojami, bei aprašomos visos eksperimentinėje dalyje panaudotos medžiagos. Eksperimentinių rezultatų aprašyme, ištirtos įvairios dirbtinio užpildo savybės, patikrintas jo stiprumas bei palygintas su pavyzdiniais bandiniais, taip pat apskaičiuotas ir anglies dioksido išskyrimas gaminant įvairius užpildus.

Baigiamajame darbe naudojamos 13 lentelių, 47 paveikslai, 44 literatūros šaltiniai.

Rimgaila, Aivaras. Glass Shards Obtained from Municipal Solid Waste Utilization in the Production of Artificial Aggregate. Master's final project / supervisor assoc. prof. Dr. Evaldas Šerelis; Kaunas University of Technology, Faculty of civil engineering and Architecture.

Field of study and field (group of study fields): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Key words: municipal waste glass, artificial aggregates, granulation, binders, compressive strength, CO₂ gas.

Kaunas, 2024. 58 p.

Summary

Materials used in the final project are cement, hydraulic lime and recycled municipal waste glass to produce artificial aggregates. A disk granulator is used to produce artificial aggregates. The obtained artificial aggregates are tested by various methods, the aggregate properties and environmental parameters are determined. The aggregates are compared with each other, and the most optimal composition of the filler is sought.

The master's final project consists of three parts: literature analysis, overview of the materials and methods used, and description of the results. The part of the literature analysis reviews the impact of construction on the environment, the use of glass as an artificial filler component, the suitability of glass as a pozzolanic additive, and the risk of alkaline corrosion, as well as various granulation methods and artificial aggregates hardening methods. The methods and materials overview describes the tests that were used and describes all the materials used in the experimental part. In the experimental results, various properties of the artificial aggregates were investigated, its strength was checked and compared with reference samples, and carbon dioxide release during the production of various aggregates was also calculated.

In the master's final project 13 tables, 47 pictures, 44 literature sources are used.

Turinys

Lentelių sąrašas:	8
Paveikslų sąrašas:	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Statybos sektoriaus CO ₂ pėdsakas aplinkai	13
1.2. Stiklo cheminė sudėtis	15
1.3. Stiklo cheminės ir fizikinės savybės	16
1.3.1. Stiklo pucolaniinis aktyvumas	16
1.3.2. Betono šarminės korozijos aktyvumas jo sudėtyje naudojant sticlą.....	19
1.4. Stiklo atliekos panaudojimas gaminant statybinius gaminius.....	21
1.5. Dirbtinio užpildo gamybos technologija.....	21
1.5.1. Granuliavimo technologija.....	22
1.5.2. Dirbtinio užpildo kietinimo būdai.....	23
2. Tyrimams naudotos medžiagos	27
2.1. Riškiliai	27
2.2. Užpildai.....	28
3. Eksperimentinėje dalyje naudoti tyrimų metodai	30
3.1. Dirbtinio užpildo gamybos technologija (granuliavimas).....	30
3.2. Betono mišinio paruošimas.....	31
3.3. Betono mišinio formavimas	31
3.4. Cemento hidratacijos tyrimas.....	31
3.5. Granulimetrinė analizė.....	31
3.6. Optinė mikroskopija.....	32
3.7. Piltinio tankio nustatymas.....	32
3.8. Vandens įgeriamumo nustatymo bandymas	32
3.9. Atsparumo šalčiui bandymas	33
3.10. Susitraukimo deformacijų matavimas.....	33
3.11. Bandinio lenkiamojo stiprio nustatymas.....	33
3.12. Bandinio gniuždomojo stiprio nustatymas.....	34
4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai	35
4.1. Stiklo atliekos paruošimas	35
4.2. Malto stiklo ir gesintų kalkių poveikis cemento hidratacijos procesui	35
4.3. Granuliavimas	37
4.4. Dirbtinių užpildų granulimetrinė analizė ir piltinis tankis.	38
4.5. Dirbtinių užpildų vizualinė analizė	40
4.6. Vandens įgeriamumo bandymo rezultatai.....	41
4.7. Dirbtinio užpildo atsparumas šalčio ardomajam poveikiui.....	43
4.8. Betono bandinių atsparumo šalčiui rezultatai	44
4.9. Dirbtinio užpildo įtaka bandinių susitraukimo deformacijai	45
4.10. Bandinių gniuždomojo ir lenkiamojo stiprių nustatymo rezultatai.....	46
4.11. Dirbtinių užpildų CO ₂ pėdsako skaičiavimas	49
Išvados	53
Literatūros sąrašas	54
Priedai	58

Lentelių sąrašas:

1 lentelė	Portlandcemenčio ir įvairaus komunalinio stiklo atliekų cheminė sudėtis [1].....	15
2 lentelė	Įvairių cheminių sudėčių stiklo fizikinės savybės [13].	16
3 lentelė	Fizikinių savybių nustatymo bandinių medžiagų kiekiai [14].	17
4 lentelė	Šarminės korozijos reakcijai nustatyti naudoti bandiniai [23].	20
5 lentelė	Portlandcemento mechaninės ir cheminės savybės.....	27
6 lentelė	Hidraulinių kalkių $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mechaninės ir cheminės savybės.....	28
7 lentelė	Pusiau adiabatinio kalorimetro metodui naudotos bandinių sudėtyys.	36
8 lentelė	Dirbtinių užpildų gamybai naudotas medžiagų kiekis kg/m^3	37
9 lentelė	Dirbtinių užpildų piltinis tankis.....	39
10 lentelė	Dirbtinių užpildų įgeriamumas.....	41
11 lentelė	Dirbtinių užpildų atsparumo šalčiui bandymo rezultatai (po 28 parų).....	43
12 lentelė	Medžiagų visuotinio atšilimo potencialo (GWP) reikšmės.....	50
13 lentelė	Medžiagų kiekiai norint pagaminti 1m^3 betono mišinio	51

Paveikslų sąrašas:

1 pav. Statybos sektoriaus atliekų dalis bendrame atliekų kiekyje ir jų perdirbimas [9].....	14
2 pav. Tipinė statybinių atliekų perdirbimo schema [9].	14
3 pav. Stiklo dalelių pasiskirstymas bandiniuose [14].	17
4 pav. Tyrimo bandinių ir kitoje literatūroje rastų medžiagų pucolaninio aktyvumo rodikliai [14].	18
5 pav. Tyrimo bandinių stiprumo rodikliai [14]	18
6 pav. Stiklo dalelės tūrio pokytis esant šarminėje aplinkoje [23].....	19
7 pav. Suminė tyrimo bandinių išsiplėtimo diagrama [23].	20
8 pav. Dirbtinio užpildo gamybos principinė schema [4].	22
9 pav. Būgninis granulatorius (kairėje), diskinis granulatorius (dešinėje) [28].	22
10 pav. Dvigubo granuliavimo metodo principas [34].	23
11 pav. Principinė temperatūrų palyginimo schema, dirbtinio užpildo terminio apdorojimo procese [35].	24
12 pav. Autoklavinė kamera ir joje gautas dirbtinis užpildas [28]	25
13 pav. Užpildo stiprumas jį kietinant įprastoje ir CO ₂ aplinkoje [39].	25
14 pav. Užpildo kietinimo CO ₂ dujomis technologinė schema [4].	26
15 pav. Portlandcemento milteliai.....	27
16 pav. Hidraulinės kalkės.	28
17 pav. Smėlis.	28
18 pav. Smėlio granulimetrinė sudėtis.	29
19 pav. Stiklo atlieka naudota eksperimentams.	29
20 pav. Diskinis granulatorius ir jame granuliuojamas užpildas.	30
21 pav. Sietai naudoti bandyme.	31
22 pav. Bandinio svorio vandenyje nustatymas.	33
23 pav. Bandinio lenkiamojo stiprio nustatymas.	34
24 pav. Bandinio gniuždomojo stiprio nustatymas.	34
25 pav. Malto stiklo paruošimo technologija (1 – atliekos surinkimas; 2 – ant stiklo esančių nešvarumų pašalinimas; 3,4 – rutulinio malūno ir malimo rutulių paruošimas darbui; 5 – atliekos ir rutulių sudėjimas į malūną; 6 – žaliavos gavimas) (sudaryta autoriaus).	35
26 pav. Skirtingų stiklo ir cemento kiekio santykių hidratacija.	36
27 pav. Skirtingų stiklo ir hidraulinių kalkių kiekio santykių hidratacija.	37
28 pav. Granulatoriumi pagaminti dirbtiniai užpildai (Nr.1 – C100, Nr.2 – C20S80, Nr.3 – C5K15S80).	38
29 pav. Dirbtinių užpildų suminės liekanos kreivės.	38
30 pav. Dirbtinių užpildų dalinės liekanos kreivės.	39
31 pav. Dirbtinio užpildo Nr.1 (C100) skerspjūvis.	40
32 pav. Dirbtinio užpildo Nr.2 (C20S80) skerspjūvis.	40
33 pav. Dirbtinio užpildo Nr.3 (C5K15S80) skerspjūvis.	41
34 pav. Dirbtinių užpildų įgėris.	42
35 pav. Prizmelių su dirbtiniu užpildu vandens įgėris.	42
36 pav. Prizmelių su dirbtiniu užpildu ir smėliu vandens įgėris.	43
37 pav. Kairėje prizmelė C100 be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė C100 su smulkiu užpildu	44

38 pav. Kairėje prizmelė C20S80 be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė C20S80 su smulkiu užpildu	44
39 pav. Kairėje prizmelė C5K15S80 be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė C5K15S80 su smulkiu užpildu.	45
40 pav. Bandinių susitraukimo deformacijų kreivės.	46
41 pav. Skirtingų bandinių tankis.	46
42 pav. Bandinio Nr. 1 (100C) skerspjūvis per suirimo vietą po lenkimo bandymo (kairėje prizmelė be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė su smulkiu užpildu).	47
43 pav. Bandinio Nr. 2 (20C80S) skerspjūvis per suirimo vietą po lenkimo bandymo (kairėje prizmelė be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė su smulkiu užpildu).	47
44 pav. Bandinio Nr. 3 (5C15K80S) skerspjūvis per suirimo vietą po lenkimo bandymo (kairėje prizmelė be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė su smulkiu užpildu).	48
45 pav. Betoninių bandinių, pagamintų iš skirtingo dirbinio užpildo, gniuždymo stipris.	48
46 pav. Betoninių bandinių, pagamintų iš skirtingo dirbinio užpildo ir smėlio, gniuždymo stipris.	49
47 pav. 1m ³ betono mišinio naudojant skirtingus stambius užpildus CO ₂ kiekis.	52

Santrumpų ir terminų sąrašas

Doc. – docentas;

Dr. – daktaras;

GWP – visuotinis ašilimo potencialas;

EPD – produkto poveikio aplinkai deklaracija;

alkali-silica reaction (angl.) – šarminės korozijos reakcija;

C100 – dirbtinis užpildas, kurio 100% masės kietųjų dalelių sudaro cementas.

C20S80 – dirbtinis užpildas, kurio kietųjų dalelių masę sudaro 20 % cemento ir 80 % malto stiklo.

C5K15S80 - dirbtinis užpildas, kurio kietųjų dalelių masę sudaro 5 % cemento, 15 % hidraulinių kalkių ir 80 % malto stiklo.

Įvadas

Vis didėjant žmonių skaičiui pasaulyje, auga ir betono sunaudojimo mastai. Norint užtikrinti tvarų šios medžiagos panaudojimą reikia apspręsti daug problemų susijusių su betono stiprumu, atsparumu aplinkos poveikiui, bei ilgaamžiškumu. Todėl labai svarbu sugalvoti alternatyvą tipiniam betonui ir sumažinti jo poveikį aplinkai. Viena iš problemos sprendimo būdų gali būti stiklo duženų išskirtų iš komunalinių atliekų srauto panaudojimas gaminant dirbtinį užpildą. Šiuo tyrimu bus išanalizuotos stiklo miltelių panaudojimo galimybės gaminant dirbtinį užpildą.

Stiklas suyra per maždaug 900 metų todėl šiems atliekoms perdirbti yra keliami vis didesni tikslai ir reikalavimai. Visame pasaulyje besikaupiančių stiklo atliekų panaudojimas yra didelė problema, kurios sprendimo būdas reikalauja išmanių ir originalių panaudojimo būdų rinkoje, produktų gamyboje.

Baigiamojo projekto esmė yra įvertinti komunalinių atliekų stiklo antrinio panaudojimo galimybę gaminant įvertinti galimybę panaudoti, gaminant dirbtinį užpildą, o vėliau jį panaudoti gaminant įvairius statybinius gaminius. Taip pat atlikti palyginimą įprastinio betono mišinio su betonu, kurio dalį sudaro dirbtinis užpildas. Atlikus įvairius tyrimus ir nustatant užpildo mechanines bei chemines savybes suprojektuoti optimaliausią dirbtinio užpildo sudėtį, kurio didžiąją dalį sudarytų malto komunalinių atliekų stiklas.

Naujumas bus užtikrinamas užpildo gamybos technologijoje arba naujo užpildo savybėse.

Problematika – stiklo atliekos suderinamumas su skirtingais rišikliais, bei užpildo pagaminimas nesumažinant gaminio stiprumo bei atsparumo įvairiems išoriniams veiksniams. Stiklo duženų išskirtos iš komunalinių atliekų srauto, savo sudėtyje turi labai didelį kiekį įvairių priemaišų, kurios ne tik lėtina pačio cemento hidratacijos procesą, tačiau taip pat gali ir turėti tokių priemaišų, kurios gali reaguojant su cementu sudaryti įvairių plėtrių junginių, kurie ženkliai pablogintų galutinio produkto savybes. Gaminant dirbtinį užpildą dėl unikalios gamybos technologijos, daugelis neigiamų užteršto malto savybių yra eliminuojamos technologinio proceso metu.

Tikslas – ištirti stiklo kaip dirbtinio užpildo sudedamosios dalies tyrimus nustatant jo optimalų panaudojimą ir gamybos technologiją, bei įvertinant aplinkos poveikį gaminant užpildą.

Baigiamojo projekto uždaviniai:

- Sukurti malto stiklo tinkamo dirbtinio užpildo gamybai paruošimo technologiją;
- Ištirti malto stiklo, išskirto iš komunalinių atliekų srauto įtaką Portlandcemenčio hidratacijos procesams;
- Ištirti pagaminto dirbtinio užpildo pagrindines fizikines bei mechanines savybes;
- Įvertinti aplinkos poveikį, kuomet vietoj tipinio užpildo naudojamas dirbtinis užpildas.

1. Literatūros apžvalga

Augant žmonių skaičiui pasaulyje, didėja ir betono sunaudojimas. Siekiant didinti antrinių žaliavų naudojimą ir mažinti statybų atliekas, Lietuvos Vyriausybė įpareigojo nuo 2024 metų visuomeninius pastatus statyti naudojant bent pusę organinių ir medienos medžiagų [44]. Tokiu būdu norima skatinti tvarią pastatų statybą, žaliųjų pirkimų ir su tuo susijusių inovacijų bei technologinę pažangą statybose. Norint užtikrinti tvarų betono panaudojimą reikia apspręsti daug problemų susijusių su betono stiprumu, atsparumu aplinkos poveikiui, bei ilgaamžiškumu. Vis dažniau įvairūs tyrėjai ir mokslininkai bando surasti aplinkai „draugišką“ betono mišinį, tam jog būtų mažinama tarša. Cementą, pagrindinę betono mišinio rišamąją medžiagą, bandoma maišyti su įvairiomis atliekomis, naudoti tam tikrus betono priedus. Nemaža dalis tyrėjų bando išsiaiškinti, kaip panaudoti stiklo atlieką, kuri išmetama į komunalinių atliekų konteinerius [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Stiklą cementinėje sistemoje galima panaudoti keliais būdais, tai tiesiogiai maišant betono mišinį įdedant tam tikros frakcijos stiklo užpildo arba gaminti dirbtinį užpildą, kuomet smulkios stiklo dalelės naudojamos kartu su tam tikrais rišikliais ir išgaunamas įvairaus dydžio užpildas [1].

Stiklas yra plačiai naudojamas daugelio žmonių buityje. Iš jo gaminami įvairiausi indai, automobilių stiklai, laboratoriniai mėgintuvėliai, monitoriai ir kt. Visi šie produktai pasižymi ribota eksploatavimo trukme [5], kuomet jie išmetami į komunalinių atliekų konteinerius. Tačiau platus šios medžiagos naudojimas atsiliepia gamtos užterštumui, kuris einant metams vis didėja. Vyriausybės organizacijos stengiasi išvengti šio nemalonaus reiškinio bandydamos įvesti naujas priemones apimančias anglies dioksido dujų (CO₂) išmetimo į atmosferą ir bendro atliekų kiekio išmetimą į aplinką mažinimui [7].

Stiklas yra unikali inertinė medžiaga, kurią galima daug kartų perdirbti, nekeičiant jo cheminių savybių. Tačiau norint perdirbti stiklą, kurį būtų galima naudoti buityje, visų pirmą jį reikia išrūšiuoti pagal spalvą. Šios procedūros galima atsakyti, jeigu stiklas bus naudojamas kelių tarpsluoksniams, asfalto gamyboje, statyboje, stiklo pluoštui ar trašoms gaminti [2].

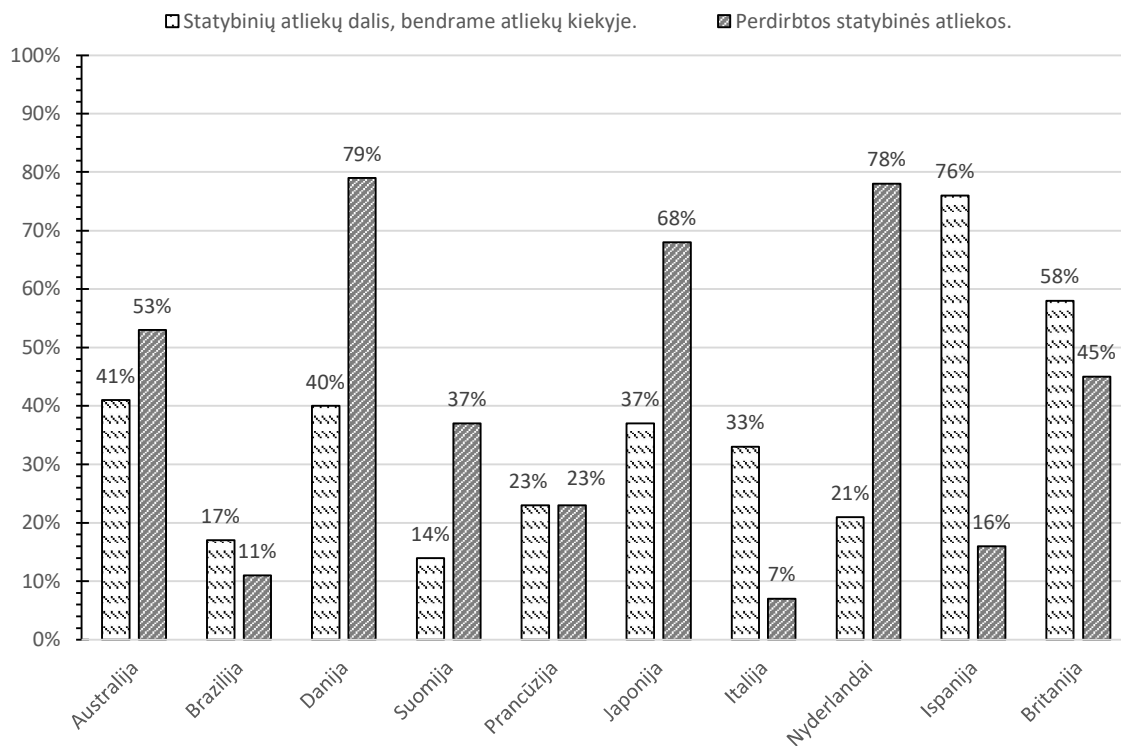
1.1. Statybos sektoriaus CO₂ pėdsakas aplinkai

Konstruktinės atliekos pagrinde susidaro iš senų pastatų demontavimo arba griovimo darbų, miesto atsinaujinimo kontekste. Daugiau nei 80% konstrukcinių atliekų yra betonas, plytos, plytelės, dekoracinės medžiagos [8]. Didelė dalis šių atliekų sugula užmiesčiuose arba tradiciniuose sąvartynuose. Taip didelė dalis dar vertingų medžiagų, kurias būtų galima dar panaudoti tampa atliekomis. Taip teršiama gamta, oras, gruntinis vanduo ir keliamas didelis ekologinis ir aplinkosauginis pavojus. Todėl mažinant išmetamų atliekų kiekį, kur dalis jų bus panaudojama antram gyvenimui yra siektinas kiekvienos išsivysčiusios šalies tikslas [9].

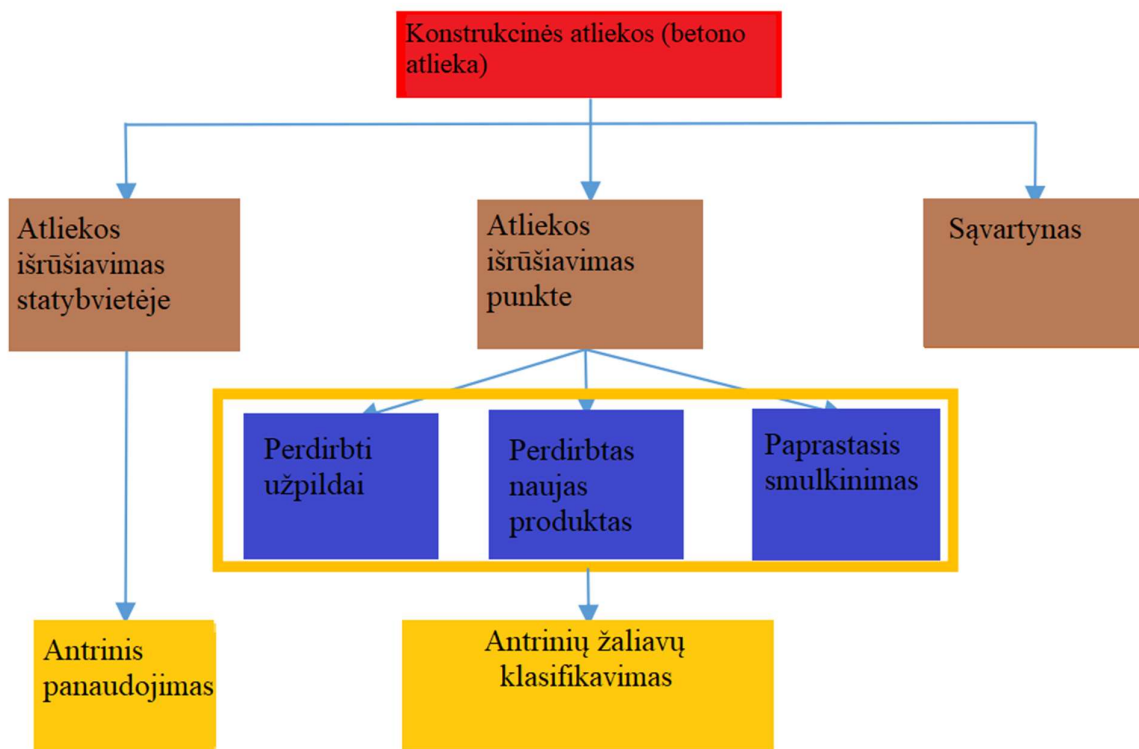
Statybinių atliekų perdirbimas labai plačiai naudojamas dalyje išsivysčiusių šalių, iš jų matoma jog techninės galimybės jas perdirbti yra prieinamos. Tokios šalys kaip Danija perdirba apie 79% visų statybinių atliekų, nuo jos neatsilieka ir Nyderlandai su 78% ir Japonija su 68%. Bendrą dalies išsivysčiusių šalių išmetamų statybinių atliekų ir jų perdirbamą dalį procentais galima matyti 1 paveiksle (žr. 1 pav.)

Statybines atliekas galima skirstyti į tris grupes, kai atlieka išrūšiuojama statybvietėje, kai atlieka išrūšiuojama rūšiavimo punkte arba kuomet atlieka yra išvežama į sąvartyną. Statybvietėje išrūšiuota atlieka dažniausiai būna panaudojama kaip tarpsluoksnis keliams ar pagrindas aikštelėms [10]. Tuo tarpu atliekos išrūšiuotos punkte gali būti panaudojamos plačiau. Perdirbant punkte atlieką

galima panaudoti kaip užpildą betone, taip pat galima iš jos pagaminti naują produktą, arba susmulkinti. Perdirbant kaip antrinę žaliavą būtina tą medžiagą klasifikuoti ir įvardinti jos savybes. [11][9]. Bendrą šią perdirbimo schemą ir panaudojimo principą galima matyti 2 paveiksle (žr. 2 pav.)



1 pav. Statybos sektoriaus atliekų dalis bendrame atliekų kiekyje ir jų perdirbimas [9].



2 pav. Tipinė statybinių atliekų perdirbimo schema [9].

1.2. Stiklo cheminė sudėtis

Norint panaudoti komunalinių atliekų stiklą kaip žaliavą, reikia žinoti jo cheminę sudėtį. Nors didžiausią masės dalį, apie 70-80%, stiklo gaminyje sudaro silicio dioksidas (SiO_2) [12], tačiau gaminio savybės priklauso nuo bendros gaminio sudėties. Vadovaujantis Saber Ibrahim ir kt. tyrimo duomenimis [1] ir jų atlikta rentgeno spindulių fluorescencine analize nustatyta portlandcemenčio (CEM I 42,5R) ir įvairių komunalinio stiklo atliekų mėginių cheminė sudėtis. Iš pateiktos lentelės matyti (žr. 1 lentelė), kad cemento pagrindinę masės dalį sudaro $\text{SiO}_2 \approx 20\%$ ir kalcio oksidas $\text{CaO} \approx 61\%$, tuo tarpu įvairių stiklo bandinių cheminės sudėtyse vyrauja tie patys junginiai, tačiau su skirtingomis procentinėmis dalimis $\text{SiO}_2 \approx 72-78\%$, $\text{Na}_2\text{O} \approx 10-15\%$, bei $\text{CaO} \approx 5-13\%$. Iš cemento ir stikle esančių junginių sudėties galima matyti, kad stiklo panaudojimas cementinėje sistemoje yra galimas dėl jame esančių cheminių junginių panašumo.

1 lentelė Portlandcemenčio ir įvairaus komunalinio stiklo atliekų cheminė sudėtis [1].

Cheminis junginys	Svoris (%)					
	CEM I	USL1	USL2	GSL	BSL	UBs
SiO_2	20,42	74,11	75,20	71,78	73,08	77,29
Al_2O_3	4,70	0,01	0,63	0,01	0,03	3,76
Fe_2O_3	3,42	0,12	0,04	0,50	0,41	0,10
CaO	61,51	10,01	12,55	10,83	11,77	4,79
MgO	2,28	2,60	0,01	1,30	0,91	0,41
K_2O	0,27	0,25	0,04	0,35	0,23	2,06
Na_2O	0,31	12,40	11,10	14,61	12,76	9,83
B_2O_3	-	-	-	0,032	0,009	3,61
BaO	-	0,088	0,084	0,086	0,088	0,795
Cr_2O_3	-	0,0003	0,0003	1,462	0,0131	0,0007
TiO_2	-	0,03	0,03	0,16	0,1	0,04
SO_3	3,35	-	-	-	-	-
Cl^-	0,04	-	-	-	-	-
Laisvasis CaO	1,32	-	-	-	-	-
L. O. I.	3,7	0,27	0,31	0,32	0,40	0,32

1.3. Stiklo cheminės ir fizikinės savybės

Paprasti komunalinių atliekų stiklai pasižymi gera pucolaniniu reaktyvumu. Tačiau reikia nepamiršti, jog dėl didelio silicio kiekio stikle, yra įmanomos šarminės korozijos reakcijos [3]. Stiklo fizikinės savybės yra ganėtinai paprastos, kadangi tai yra amorfinė medžiaga. Moso skalėje silicio oksidas (SiO₂) arba kvarcas priskirtas 100 absoliutiniam kietumui [1].

2 lentelė Įvairių cheminių sudėčių stiklo fizikinės savybės [13].

Stiklo sudėtis	Fizikinės savybės									
	Tankis (g/cm ³)		Šiluminio plėtimosi koeficientas (10 ⁻⁷ /°C)		Šviesos lūžio rodiklis (n _D)		Tamprumo modulis (GPa)		Šlyties modulis (GPa)	
	Vertė	Δ, %	Vertė	Δ, %	Vertė	Δ, %	Vertė	Δ, %	Vertė	Δ, %
Na ₂ O-SiO ₂	24	-0,7	10	-6,2	9	-0,6	5	4,2	14	13,0
Li ₂ O-SiO ₂	19	-0,4	5	5,3	11	-0,4	5	2,2	12	7,0
K ₂ O-SiO ₂	16	-1,2	7	3,4	9	-0,3	27	21	7	21,0
Na ₂ O-B ₂ O ₃	9	-2,0	3	2,0	8	-0,9	13	-7,8	28	-11
K ₂ O-B ₂ O ₃	16	-3,0	4	8,0	16	-1,0	17	-16,0	34	-11

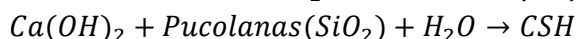
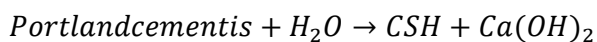
1.3.1. Stiklo pucolaninis aktyvumas

Pucolanai - tai neorganinės kilmės, daug silicio arba silicio-aliuminio junginių turinčios medžiagos. Pats pucolanas nesumaišytas su jokia kita medžiaga pasižymi labai silpnomis cementavimo savybėmis. Tačiau smulkiai sumalus pucolaną panaudojant vandens ir kalcio hidroksidą, kambario temperatūroje, įvyksta reakcija, kurios metu susiformuoja junginiai, turintys rišamąsias savybes [14]. Taigi ši medžiaga gali būti įtraukta į betono gamybą formuojant kitokias cemento rūšis arba panaudojant stiklą kaip vertingą medžiagą gaminant dirbtinį užpildą, taip mažinant taršą sukliamą betono gamyboje [15].

Pucolaninis aktyvumas nusakomas kaip cheminė reakcija, kurios metu tam tikros medžiagos reaguodamos su kalcio hidroksidu (Ca(OH)₂), kuris yra šalutinis produktas portlandcemenčiui reaguojant su vandeniu, suformuoja junginius, kurios turi rišamąsias savybes [16].

Pucolaninė reakcija sujungia kalcio hidroksidą (Ca(OH)₂) ir pucolaną, taip suformuojami antriniai kalcio hidrosilikatai (C-S-H), kurie dar labiau pagerina betono fizikines savybes ir ilgaamžiškumą [14].

Pucolaninė reakcija:



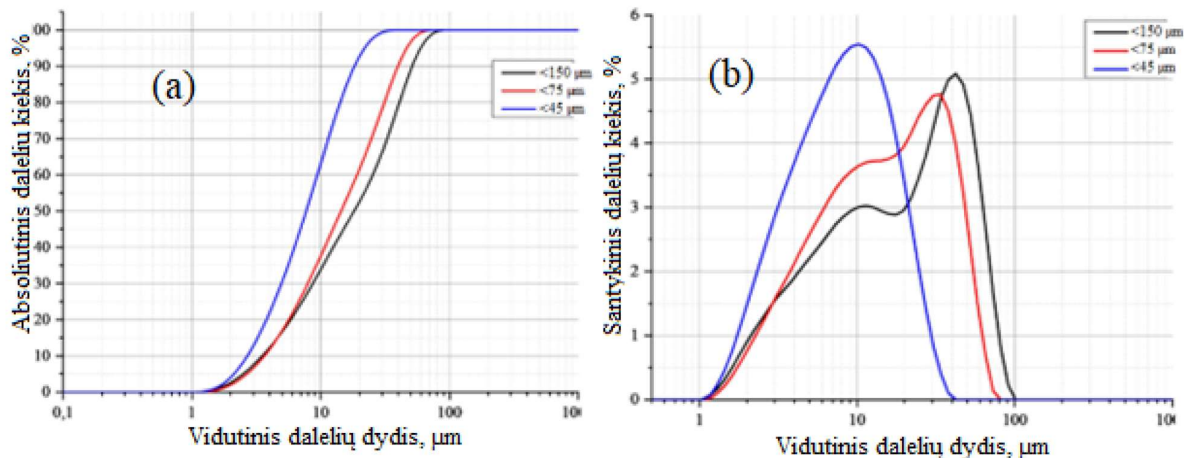
Alexandre Lopes Borges ir kt. [14] pateiktoje publikacijoje buvo norima išsiaiškinti kokio smulkumo pucolanas (šiuo atveju stiklo atlieka) geriausiai pasireiškia pucolanine reakcija. Bandymui buvo naudoti trijų skirtingų frakcijų stiklo milteliai (<150 μm; <75 μm <45 μm), kurie buvo malami rutuliniu malūnu. Tuomet gaminami bandiniai, su kuriais buvo norima sužinoti pucolano aktyvumą ir betono savybes įmaišius stiklo miltelių. Betono stiprumo bandymui naudotos medžiagos (žr. 3 lentelė.)

3 lentelė Fizikinių savybių nustatymo bandinių medžiagų kiekiai [14].

Bandiniai	Medžiagų masės (g)				V/C santykis (g/g)	Slankumo bandymo rodmuo (mm)
	Portlandcementis	Smėlis	Stiklo milteliai	Vanduo		
Atskaitinis bandinys	624,0	1872,0	-	300,0	0,48	156,0
< 150 μm	468,0	1872,0	156,0	300,0	0,48	154,3
< 75 μm	468,0	1872,0	156,0	300,0	0,48	151,0
< 45 μm	468,0	1872,0	156,0	300,0	0,48	150,0

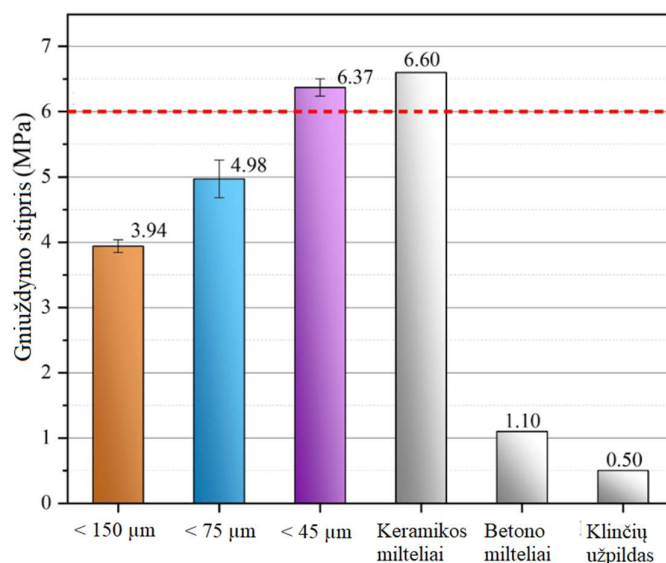
Tyrėjų bandymo rezultatų aptarimas:

1 paveiksle (žr. 1 pav.) matomas stiklo dalelių pasiskirstymas ir sklaida kiekviename bandinyje pagal atitinkamą dalelės dydį. Diagramoje matyti, jog didžiausias 90 μm dalelės dydis matomas bandinyje, kurio stiklo dalelės dydis buvo < 150 μm , tačiau mažiausios 1 μm dalelės kiekviename bandinyje pasiskirstė vienodai.



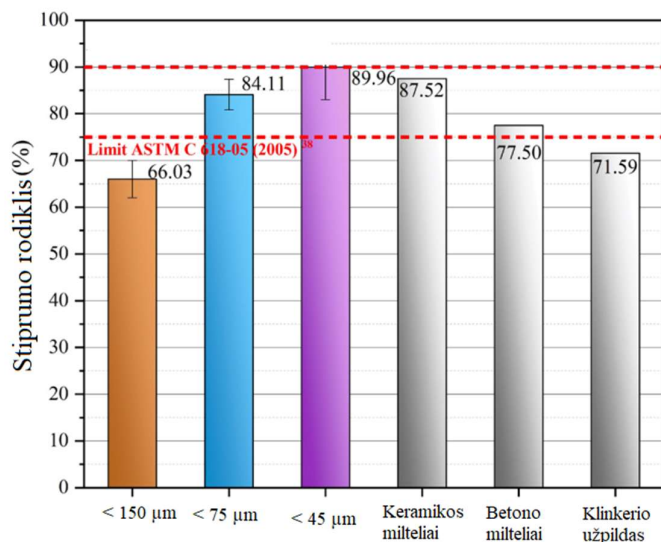
3 pav. Stiklo dalelių pasiskirstymas bandiniuose [14].

Nustatant pucolaninio aktyvumo rodiklį ir išstudijavus visus bandinius, bei panaudojant kito tyrėjo atliktą bandymą, kuomet buvo naudoti keramikos milteliai ($d = 30 \mu\text{m}$), betono atliekos milteliai ($d = 25 \mu\text{m}$) ir klinčių užpildas ($d = 20 \mu\text{m}$) kaip atskaitos taškai [17]. Antrame paveiksle (žr. 2 pav.) matoma, jog po 7 dienų tik stiklo milteliai, kurių dydis buvo mažesnis nei 45 μm pasiekė ribinę 6MPa reikšmę. Verta paminėti, jog iš rezultatų galima spręsti, jog mažinant stiklo dalelės dydį pucolaninio aktyvumo indeksas didėja [14]. Panaši tendencija pastebėta ir Caijun Shi ir kt. mokslininkų atliktame tyrime [18].



4 pav. Tyrimo bandinių ir kitoje literatūroje rastų medžiagų pucolaninio aktyvumo rodikliai [14].

Nustatant bandinių mechanines savybes buvo gauta, jog bandinių stiprumo rodiklis koreliuoja su stiklo dalelių smulkumu, norint vadinti stiklo miltelius kaip pucolaninį priedą amerikietiška standarte ASTM C 618-05 (2005) nurodyta, jog stiprumo rodiklis turi tenkinti 75% ribą, tuomet bandinys, kurio dalelių smulkumas siekė iki 150 μm yra netinkamas naudoti kaip pucolaninis priedas.



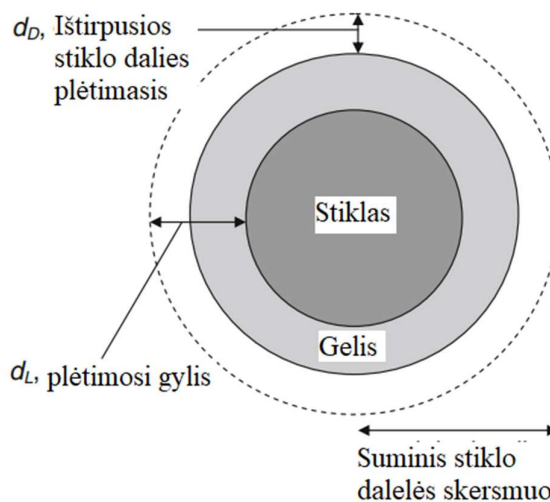
5 pav. Tyrimo bandinių stiprumo rodikliai [14]

Apibendrinant galima teigti, jog pucolaninis aktyvumas labiausiai priklausomas nuo pucolano smulkumo, cheminės sudėties ir porų išsidėstymo [18]. Buvo pastebėta jog stiklas išgautas iš komunalinių atliekų srauto pasireiškia pucolaniniu aktyvumu kai dalelės dydis yra mažesnis nei 150 μm. Išbandant trijų skirtingų smulkumų bandinius pastebėta, jog geriausias rezultatus parodė bandinys, kuriame didžiausias dalelės dydis siekė 45 μm. Toks dalelių smulkumas pasiekiamas stiklą malant rutuliniu malūnu, kuris naudojamas cemento klinkerio malimui [2].

1.3.2. Betono šarminės korozijos aktyvumas jo sudėtyje naudojant stiklą

Buityje naudojamas stiklas yra lengvai perdirbama medžiaga, neįdedant didelių energijos išteklių jis gali būti labai lengvai perdirbamas ir naudojamas daugelį kartų. Tačiau daugumoje atvejų sukaupti dideli kiekiai komunalinių atliekų stiklo ir perdirbimo įmonės nėra pajėgios susitvarkyti su tokiu dideliu kiekiu stiklo. Ieškomi alternatyvūs sprendimai norint išspręsti šią problemą. Vienas iš sprendimų stiklą panaudojant kaip dirbtinį užpildą betone, tačiau šarminė betono korozija dėl stiklo yra viena iš problemų, dėl kurios stiklo panaudojimas nėra toks efektingas. [19]

Betono sudėtyje naudojant didelį kiekį stiklo išgauto iš komunalinių atliekų srauto laikoma rizikinga, žinoma, jog tai gali sukelti betonui kenksmingą šarminės korozijos reakciją (angl. alkali-silica reaction) [20]. [21] [22] Stiklas turi teigiamų savybių, kurios leidžia jį panaudoti kaip užpildą. Tačiau jo naudojimo betone vengiama, nes žinoma, kad jis yra pagrindinis kenksmingos šarminės korozijos reakcijos sukėlėjas, jam reaguojant su portlandcemenčiu, stiklo plėtimąsi šarminėje aplinkoje galima matyti 4 paveiksle (žr. 4 pav.). Tyrimai parodė, kad dalelių dydis ir stiklo spalva su dalelės smulkumu turi didelę įtaką šiai reakcijai (kuo smulkesnė dalelė tuo betono šarminės korozijos aktyvumas yra mažesnis) [20]. Be to, smulkiai sumaltas stiklas leidžia susiformuoti papildomiems kalcio hidrosilikatams betone, kurie didina jo stiprumą [23].



6 pav. Stiklo dalelės tūrio pokytis esant šarminėje aplinkoje [23]

Ravindra K. Dhir ir kt. [23] straipsnyje aprašytas stiklo šarminės korozijos nustatymas naudojant įvairias medžiagas ir priedus pagreitinant šarminės korozijos reakcijai. Suformuotos 10 betono mišinio sudėčių, kuriose skyrėsi natrio oksido (Na_2O), cemento (CEM I 42,5R), malto granulioto aukštakrosnių šlako (GGBS), metakaolino (MK), kalio sulfato (K_2SO_4), natūralaus užpildo (20mm, 10mm, smulkaus) ir stiklo kaip smulkaus užpildo kiekiai. Visi panaudoti medžiagų kiekiai pateikti 4 lentelėje (žr. 4 lentelė).

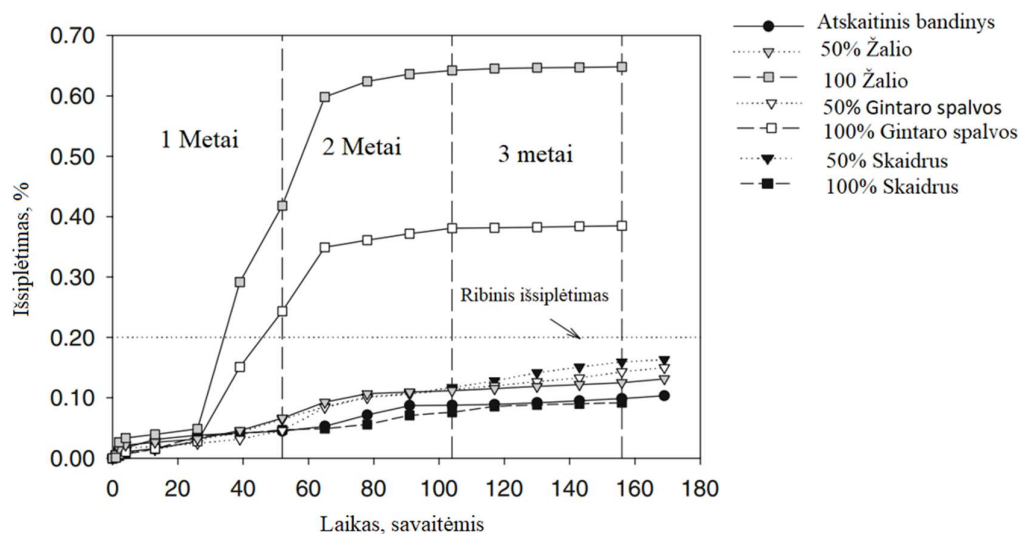
4 lentelė Šarminės korozijos reakcijai nustatyti naudoti bandiniai [23].

Bandinys	Mišinio sudėtis kg/m ³										
	Na ₂ O		Cementas			Vanduo	K ₂ SO ₄	Užpildas			Stiklas
	a	b	CEM I, 42,5 R	GGBS	MK			20mm	10mm	smulkus	
1	7	7	697	-	-	228	5,959	572	427	434	-
2	7	7	697	-	-	228	5,959	572	427	-	409
3	7	7	697	-	-	228	5,959	572	427	211	210
4	7	7	697	-	-	228	5,959	572	427	344	85
5	4,6	39,2	455	-	-	228	3,908	572	427	434	191
6	6,1	18,2	612	-	-	228	5,257	572	427	434	67
7	4,7	4,7	335	335	-	228	2,873	572	427	-	409
8	4,7	4,7	335	335	-	228	2,873	572	427	434	-
9	7,1	7,1	614	-	68	228	5,272	572	427	-	409
10	7,1	7,1	614	-	68	228	5,272	572	427	434	-

Visų sudėčių bandinių buvo pagaminti po 3, sumaišyti bandiniai buvo suformuoti 100x100x300mm³ formose. Toliau buvo stebimas suformuotų bandinių stiklo dalies plėtimasis tūryje.

Straipsnio rezultatų aptarimas [23]:

Stebint bandinių tūrio pokyčius buvo pastebėta, jog didžiausią šarminės korozijos poveikį turėjo skaidrus stiklas, kai 50% dalies bandinių smulkaus užpildo sudarė stiklas, išsiplėtimas siekė apie 0,17%, kur 0.2% laikoma pavojinga riba betonui dėl plyšių atsiradimo [23]. Tačiau stebint atvejį kai 100% dalies bandinių smulkaus užpildo sudarė stiklas, žalio ir gintarinės spalvos stiklo šarminės korozijos lygis viršijo leistiną ribą, žalio išsiplėtimas siekė apie 0,63%, o gintarinio apie 0,38%. Verta paminėti kad šių bandinių šarminės korozijos staigiausias šuolis pastebimas 25 savaitę, kur visi likę bandiniai kito tolygiai. Pastebėta, kad aktyvesnė skirtingų spalvų šarminė korozija dėl stiklo sudėtyse esančių nikelio, rubidžio ir galimai cinko. Bendrą bandinių šarminės korozijos poveikio diagramą galima matyti 4 paveiksle (žr. 4 pav.)



7 pav. Suminė tyrimo bandinių išsiplėtimo diagrama [23].

Apibendrinant galima teigti jog stiklo kaip smulkaus užpildo panaudojimas betone gali sukelti pavojingą šarminės korozijos reakciją, pastebėta, jog kuo didesnis stiklo dalelės dydis tuo pavojingesnė šarminės korozijos reakcija [24]. Taip pat svarią įtaką turi ir stiklo spalva ir sudėtis, kadangi bandymo metu nustatyta, jog žalios ir gintarinės spalvos stiklo šarminės korozijos reakcija, kuomet stiklas užima 100% smulkaus užpildo masės yra ženkliai didesnė, manoma, jog tai yra dėl stikle esančių spalvą suteikiančių junginių. Verta paminėti, jog išsiplėtimas gali būti suvaldomas betono mišinyje panaudojus malto granuliuoto aukštakrosnių šlako arba metakaolino. Taip pat norint sumažinti šarminės korozijos poveikį galima naudoti tik stiklo miltelius [24].

Po didesnio laiko tarpo nei 12 mėnesių dauguma bandinių pasižymėjo didesniu išsiplėtimu, todėl verta atlikti ilgesnius nei 12 mėnesių tyrimus.

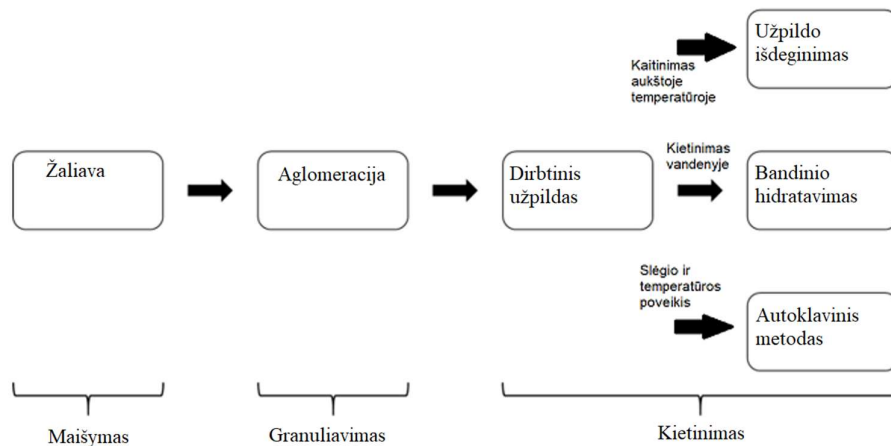
1.4. Stiklo atliekos panaudojimas gaminant statybinius gaminius

Komunalinių atliekų stiklas yra laikomas kaip alternatyvi medžiaga statyboje. Per pastaruosius metus statybos sektoriuje matomas stiklo atliekos panaudojimo augimas ir mokslo susidomėjimas ja [25]. Tai yra todėl, kad stiklas pasižymi paprastomis fizikinėmis savybėmis ir chemine kompozicija. Keletas vertinamų stiklo savybių yra mažas vandens įgeriamumas ir cheminio elemento silicio (Si) kiekis [26]. Dauguma tyrėjų stiklą panaudojo kaip alternatyvų užpildą skiedinyje ar betone. Tačiau dauguma tyrėjų naudodami stiklą kaip 5-10 mm frakcijos užpildą pastebėjo, jog gniuždymo stipris atitinkamai nuo stiklo kiekio bandinyje mažėja. Negana to buvo pastebėta jog minimos frakcijos stiklo užpildas sukeldavo šarminę koroziją betono bandinyje, ko pasėkoje didėjant šarminės korozijos produktų tūriui pastebėti trūkimai bandinyje ar paviršiaus atšokimai. Šis neigiamas reiškinys pasireiškė dėl betone esančios šarminės aplinkos ir didelio prieinamo silicio kiekio stikle [2, 6, 12]. Pastebėję šiuos neigiamus reiškinius tyrėjai apleido stiklo panaudojimą kaip stambų užpildą ir skyrė didesnę dėmesį stiklo panaudojimui kaip smulkiam užpildui [12].

1.5. Dirbtinio užpildo gamybos technologija

Didžiosios dalies atliekų ar pramonės šalutinių produktų panaudoti tiesiogiai jų pirmiausia neapdirbant yra netikslinga, kadangi tai gali sukelti neigiamą poveikį norimo pagaminti produkto (betono) savybėms ar netgi aplinkai [27]. Suvokiant, jog stiklas gali būti pavojingas betono mišiniui, kuomet jis yra naudojamas kaip smulkus, arba didesnio nei 10mm dydžio užpildas yra šarminės korozijos problema tampa sudėtinga išspręsti. Naudojant dirbtinio užpildo gamybos technologiją, kai jam pagaminti yra panaudojami stiklo milteliai, kur dalelės dydis yra mažesnis nei 300 μm, tokiu būdu papildomai panaudojant rišamąsias medžiagas galima pagaminti stambų (>5mm) arba smulkų užpildą, taip išvengiant šarminės korozijos rizikos, bei atsirandant pucolaninės reakcijos galimybei. [28].

Dirbtinis užpildas yra žmogaus pagamintas statybos produktas, kurio fizinės ir cheminės savybės labai stipriai priklauso nuo gamybos proceso (pvz. granulavimas ir kietinimas) ir panaudotų žaliavų (dažniausiai įvairios kilmės atliekų) [4, 29]. Gaminant dirbtinį užpildą paprastai siekiama pagaminti medžiagą tvirtu paviršiniu sluoksniu ir stipria vidine struktūra, bei didesniu poringumu ir susietu mažesniu užpildo svoriu. Šie užpildai gali būti naudojami įvairiuose betono mišiniuose ir gaminiuose įskaitant struktūrinį gruntą arba šilumą izoliuojančią medžiagą. Papildant, gaminant potencialiai vertingą produktą iš komunalinių ar kitų atliekų galima pasiekti papildomų aplinkosauginės naudos, taip mažinant taršą pasaulyje [30, 31].

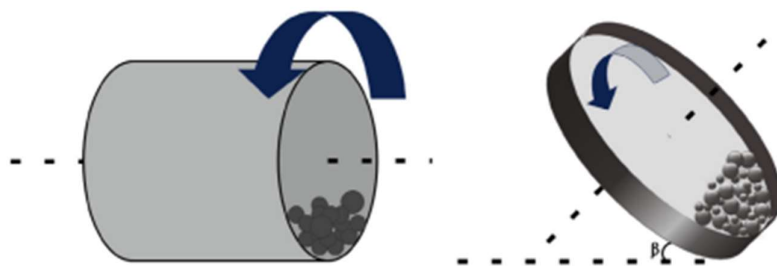


8 pav. Dirbtinio užpildo gamybos principinė schema [4].

1.5.1. Granuliavimo technologija.

Granuliavimas yra procesas, kurio metu mažos kietosios dalelės 1-500 μm dydžio konsoliduojasi į didesnio dydžio užpildus (2-10mm). Šiuo metu dažniausiai taikomi granuliavimo metodai yra granuliavimas maišant ir granuliavimas tankinant [28].

Užpildo granuliavimas maišant yra procesas, kai smulki sudrėkinta dalelė konsoliduojasi į didesnę granulę ją maišant besisukančiame būgne nenaudojant jokio išorinio slėgio [32]. Granulės pradžioje gaunamos kai dėl vandens tiltelio, paviršiaus įtempių, klampumo jėgų ar kapiliarinio slėgio susiformuoja rišamosios jėgos, susiformavus granulėms dėl išorės veiksnių toliau visą darbą perima užpilde esančios rišamosios medžiagos [32]. Granuliavimo metu gautas produktas (šviežia granulė) pasižymi labai mažu pradiniu stiprumu, todėl su gautomis granulėmis reikia elgtis atsargiai ypač sandėliuojant ar gabenant.



9 pav. Būgninis granulatorius (kairėje), diskinis granulatorius (dešinėje) [28].

Kai kuriais atvejais, cheminių priedų ar rišiklių panaudojimas gali paspartinti granuliavimo procesą ir efektyvumą. Remiantis Feras Tajra, ir kt. [33] straipsnio duomenimis panaudojus apie 20% cemento nuo bendros bandinio masės granuliavimo efektyvumas padidėjo 95%, kadangi cementas palengvino dalelių tarpusavyje susirišimą. Taip pat naudojant cementą kaip granulių rišiklį buvo aptikta, jog kalcio hidroksidas ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) paspartino granuliavimo procesą [33]. Be to skirtingas efektyvumo padidėjimo pasiskirstymas buvo pastebėtas naudojant kitus įvairius rišiklius (bentonito, kaolinito), tačiau norint pasiekti 98% efektyvumą šių priedų reikėjo panaudoti daugiau [28].

Apart skirtingų medžiagų naudojimo taip pat labai svarbus faktorius yra granulatoriaus technologinis paruošimas. Pagrindiniai faktoriai yra disko pasvirimo kampas, apsisukimų greitis, disko skersmuo ir granuliavimo laikas. Pastebėta, jog disko pasvirimo kampas buvo ribojamas nuo 35°-50°, o apsisukimų greitis tarp 35 ir 55 apsisukimų per minutę. Aptikta, jog egzistuoja priklausomybė tarp apsisukimo greičio, disko diametro ir disko pasvirimo kampo [28]. Todėl išvesta kritinio apsisukimo lygtis (1);

$$n_{cr} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \sqrt{\sin \beta} \quad (1.3.1)$$

Kur:

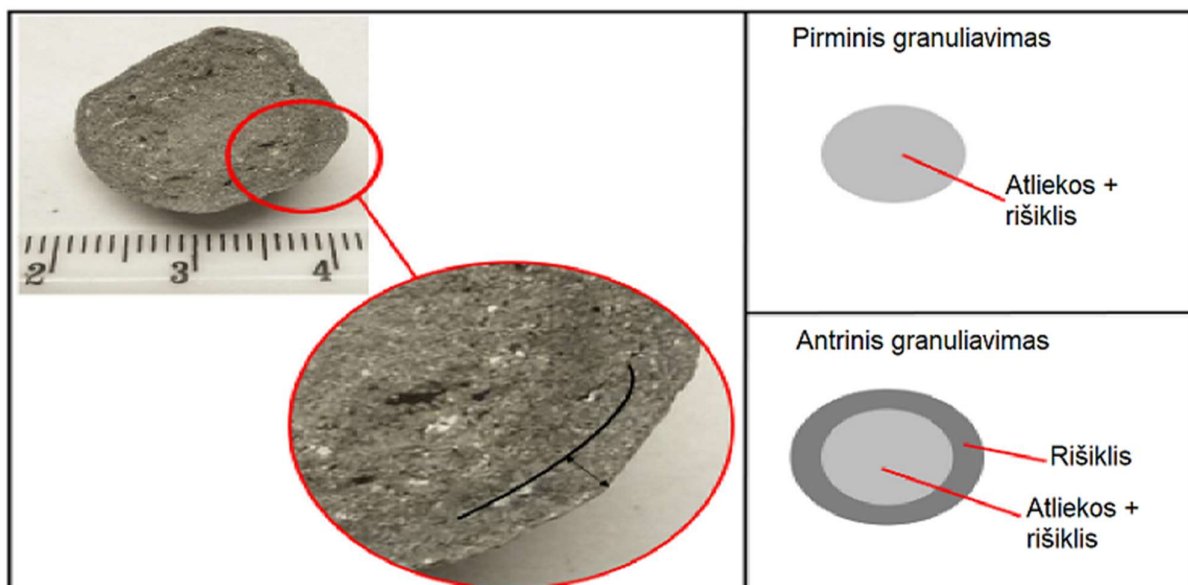
n_{cr} – kritinis apsisukimo greitis (apsisukimai per minutę [rpm]),

D – disko skersmuo metrais (m),

β – disko pasvirimo kampas (°).

Papildant, granulių formavimasis prasidėdavo 6-9 minutę ir visiškai susiformavimas apie 20 minutę, granuliuojant dar ilgiau granulių stiprumas kildavo nežymiai, o laiko sąnaudos pakildavo apie 50%. [4, 28, 33].

Norint dar labiau sustiprinti dirbtinį užpildą Francesco Colangelo, Francesco Messina, Raffaele Cioff išbandė dvigubo granuliavimo metodą kurio metu jau sugranuliuotas pirminis dirbtinis užpildas papildomai būdavo granuliuojamas naudojant tik rišiklį šiuo atveju cementą [34].



10 pav. Dvigubo granuliavimo metodo principas [34].

Atlikus eksperimentą aprašytos išvados ir nustatyta, jog norint gauti optimaliausią dirbtinio užpildo variantą, kuris pasižymėtų geriausiu stiprumu, cementas turėtų sudaryti 20 % mišinio masės, jis turėtų granuliuotis 35° kampu ir apie 30 apsisukimų per minutę greičiu. Papildant, gautas užpildo tankis siekė apie 510-636 kg/m³, o gniuždymo stipris nuo 2,04 MPa iki 2,66 MPa [34].

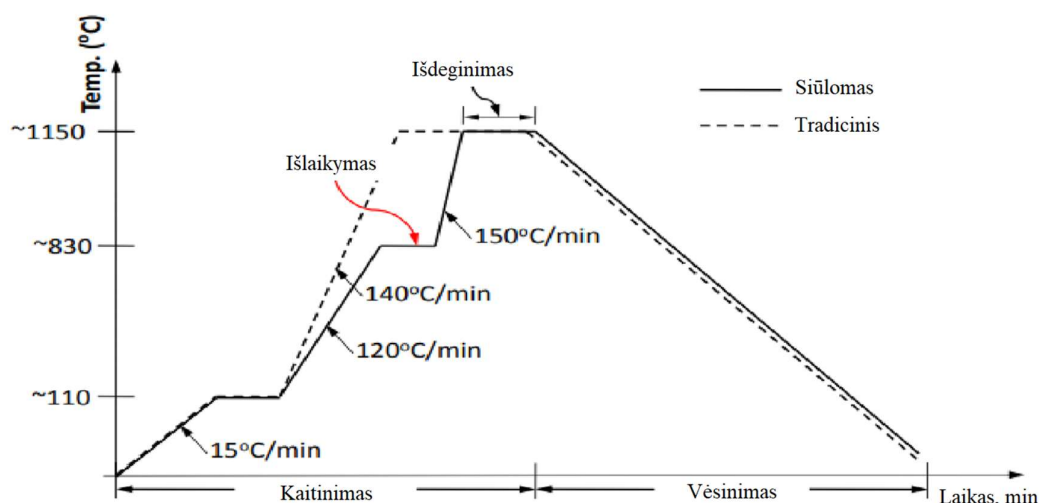
1.5.2. Dirbtinio užpildo kietinimo būdai.

Sugranuliuavus dirbtinį užpildą labai svarbu parinkti tinkamą jo kietinimo būdą. Išdeginimas yra klasikinis ir plačiai naudojamas kietinimo metodas gaminant komercinius dirbtinius užpildus. Kitas

kietinimo būdas naudojant CO₂ dujas taip paspartinant karbonizacijos procesą, autoklavinis metodas taip pat dažnai naudojamas, jo metu naudojama aukštesnė temperatūra ir slėgis, kuris leidžia greičiau užpildui sukietėti [4].

Išdeginimas:

Išdeginimo procesui atlikti suvartojamas didelis kiekis energijos, kad būtų galima gauti dirbtinį užpildą su geresnėmis fizikinėmis savybėmis. Remiantis skirtinga literatūra išdeginimui naudojamos žaliavos turinčios didelį kiekį SiO₂ ir Al₂O₃ [4, 28, 34, 35]. Po granuliavimo produktas paliekamas 24 valandoms, kad galėtų išdžiūti, tuomet granulės sudedamos į krosnelę, kurios temperatūra tarp 1180°C ir 1200°C ir laikoma apie 30min. Kartais dalis granulių susijungia aukštesnėje nei 1200°C taip pasiekiamos optimaliausios produkto savybės [4]. Tyrimo metu buvo pasiūlyta nauja temperatūros kreivė kaip kontrastas tradicinei. Įvesta laikymo stadija, jos metu buvo užtikrinama, jog ilgesnį periodą veikianti maždaug 830°C padės optimaliau išdeginėti anglį. Taip pat šis metodas padėjo sutaupyti kepinimo fazės laiką [35].



11 pav. Principinė temperatūrų palyginimo schema, dirbtinio užpildo terminio apdorojimo procese [35].

Atlikus bandymo analizę pastebėta, jog naudojant kepinimo būdu pagamintą dirbtinį užpildą, betono bandinių stiprumas pasiekė 91 % 28 dienų sąlygos stiprumą per 7 dienas [35].

Autoklavinis metodas:

Autoklavinio metodo esmė yra kietinti medžiagą naudojant aukštą slėgį ir temperatūrą, Dongyun Wang ir kt. atliktas tyrimas su kvarco atliekomis, kurio metu 24 valandas džiovinamas normalioje aplinkoje, tuomet užpildas patalpinamas į autoklavinę kamerą (12 pav.), kurioje pasiekama apie 195°C temperatūra ir veikiant 1,38MPa slėgiui 3 valandas. Užpildas papildomai buvo kietinamas dar 10 valandų 195°C temperatūroje normaliame slėgyje ir tuomet atvėsinamas iki kambario temperatūros. Galutinis produktas pasiekė 1100 kg/m³ tankį [36]. Autoklavinio metodu kietintas užpildas pagamintas greičiau nei išdeginimas metodu, taip pat tokiam užpildui reikėjo mažiau rišiklio ir trumpesnio kietėjimo laiko

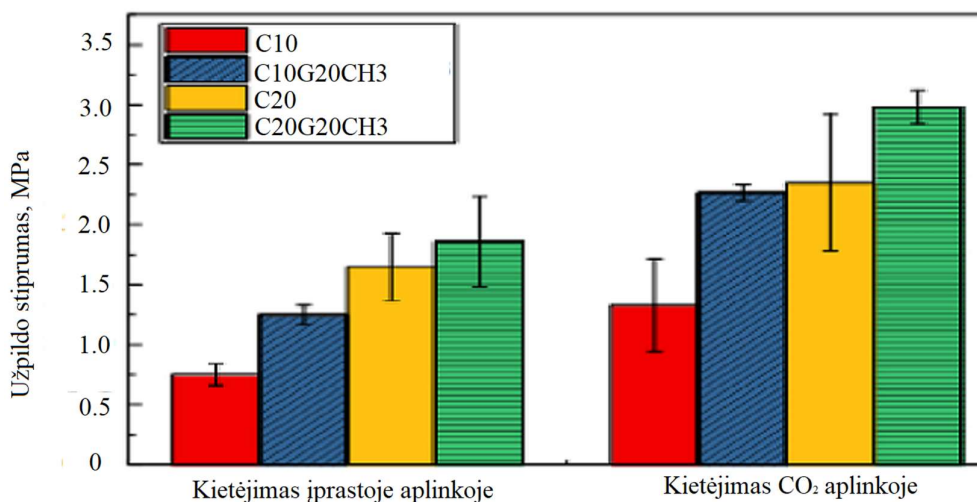


12 pav. Autoklavinė kamera ir joje gautas dirbtinis užpildas [28]

Tačiau autoklavinio metodo galimybės dar nėra pilnai ištyrtos. Tai yra dėl pakankamai brangios įrangos (autoklavinės kameros), kuri galėtų sukurti užpildo kietėjimui reikalingas sąlygas. Taip pat norint gaminti užpildą dideliu mastu jo energetinės išlaidos būtų gan didelės [4].

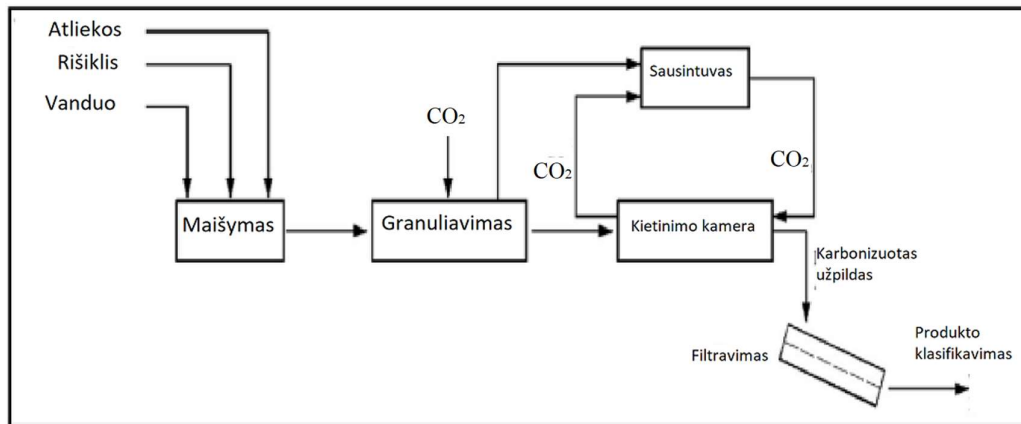
Kietinimas CO₂ kameroje:

Pagreitinta karbonizacija gali būti panaudojama kaip dirbtinio užpildo kietinimo būdas. Didelės CO₂ koncentracijos aplinkoje galimas žymus stipruminių savybių padidėjimas iki tam tikro lygio. Yi Jiang ir kt. remiantis atlikto tyrimo duomenimis nustatyta naudojant skirtingą bandinių sudėtį, kai buvo keičiamas rišiklio (cemento kiekis) [37]. Taip pat pastebėta jog didesnėje temperatūroje kietinami užpildai pasižymėdavo greitesne karbonizacijos reakcija. Karbonizacijos kameroje komunalinių atliekų užpildai pasireiškė 60 % aukštesniu karbonizacijos laipsniu, nei paprastoje aplinkoje kietinti komunalinių atliekų užpildai. Pagreitinta užpildų karbonizacija 70 °C temperatūroje pasižymėjo ir apie 23,6 % mažesniu vandens įgeriamumu [38].



13 pav. Užpildo stiprumas jį kietinant įprastoje ir CO₂ aplinkoje [39].

Pagrindinė CO₂ kietinimo technologijos problema yra aukšta gryno CO₂ kaina. Todėl kol kas šios technologijos neapsimoka pritaikyti dirbtinių užpildų kietinimui didesniu mastu. Tačiau atitiki sėkmingi bandymai parodė jog įmanoma pagaminti dirbtinį užpildą, kurio stiprumas siekia net 11,05 MPa [4].



14 pav. Užpildo kietinimo CO₂ dujomis technologinė schema [4].

2. Tyrimams naudotos medžiagos.

2.1. Rišikliai

Portlandcementis

Tyrimams naudotas portlandcementis CEM I 42,5 N. Tai rišiklis turintis 95-100 % klinkerio ir iki 5 % papildomų komponentų. Pagrindiniai klinkerio mineralai suteikiantys cementui hidraulinės savybes: trikalcio silikatas ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), dikalcio silikatas ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), trikalcio aluminatas ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), bei tetrakalcio aluminioferitas ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Gamintojo nurodytos eksploatacinės rišiklio savybės pateiktos **5 lentelėje**.

5 lentelė Portlandcemento mechaninės ir cheminės savybės.

Esminės charakteristikos	Eksploatacinės savybės
Cemento tipas	CEM I 42,5N
Gniuždymo stipris, MPa:	
• Ankstyvasis stipris	$\geq 10,0$
• Standartinis stipris	$\geq 42,5 \leq 62,5$
Rišimosi pradžia, min	≥ 60
Kaitmenys, %	$\leq 5,0$
Netirpmenys, %	$\leq 5,0$
Sulfatų (SO_3) kiekis, %	$\leq 3,5$
Chloridų kiekis, %	$\leq 0,10$
Šarmų kiekis, sk Na ₂ O ekv., %	$\leq 0,80$



15 pav. Portlandcemento milteliai.

Hidraulinės kalkės

Kaip ekologiškesnė alternatyva portlandcemenčiui dirbtinio užpildo gamyboje pasirinktos hidraulinės kalkės $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Šis rišiklis nepasižymi puikiomis mechaninėmis savybėmis, tačiau panaudojant rišiklį kartu su pucolaniniu priedu (šiuo atveju stiklu) galima išgauti geresnes dirbtinio užpildo savybes. Tuomet praktinis šio užpildo panaudojimas tampa efektyvesnis, kadangi sumažėja panaudojamo portlandcemenčio kiekis, taip pat ir išmetamas anglies dioksido (CO_2) kiekis į aplinką [40]. Šios medžiagos gamintojo nurodytos eksploatacinės savybės pateiktos **6 lentelėje**.

6 lentelė Hidraulinių kalkių Ca(OH)_2 mechaninės ir cheminės savybės.

Esminės charakteristikos	Ekspluatacinės savybės
Stiprumas gniuždant 28 d.	$\geq 3,5$ iki ≤ 10 MPa
Piltinis tankis kg/dm^3	0,55
Laisvasis CaO kiekis %	32
SO_2 , kiekis %	0.4
Ca (OH) ₂ , kiekis, %	≥ 25
Sulfatų (SO ₃) kiekis, %	≤ 2
Likutis 0,09 mm, %	≤ 15
Likutis 0,02 mm, %	≤ 2
Laisvasis vanduo, %	≤ 2
Erdvinis stabilumas, mm	≤ 20
Oro kiekis, %	≤ 5
Rišimosi pradžia,	> 1 h
Rišimosi pabaiga	≤ 30 h



16 pav. Hidraulinės kalkės.

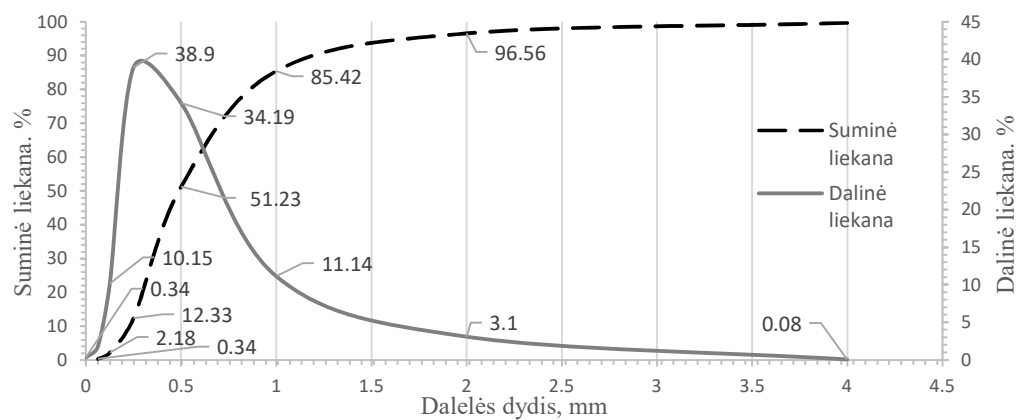
2.2. Užpildai

Smulkus užpildas (smėlis)

Eksperimentams kaip smulkus užpildas naudotas vidutinio stambumo smėlis. Pagrindinės smulkaus užpildo fizikinės savybės: dalelės dydis 0/2mm, piltinis tankis 1716 kg/m^3 , vidutinis dalelių tankis 2636 kg/m^3 , tuštymėtumas 34,9%, molio ir dulkių kiekis 0,42%. Smėlio granulimetrinė sudėtis pateikta **18 pav.**



17 pav. Smėlis.



18 pav. Smėlio granulimetrinė sudėtis.

Stiklas.

Ekperimentiniams tyrimams pasirinktas mišrus komunalinių atliekų stiklas. Ši medžiaga yra itin inertiška, todėl pasižymi dideliu atsparumu įvairiems cheminiams ir biologiniams poveikiams. Tačiau panaudojus tam tikrus technologinius procesus stiklas gali įgauti pucolaninio priedo savybių taip pagerindamas rišiklio mechanines savybes [41].



19 pav. Stiklo atlieka naudota eksperimentams.

3. Eksperimentinėje dalyje naudoti tyrimų metodai

3.1. Dirbtinio užpildo gamybos technologija (granuliavimas)

Dirbtiniai užpildai paprastai gaminami granuliavimo būdu. Granuliavimas yra aglomeracijos procesas, kurio metu smulkios sudrėkintos dalelės susijungia tarpusavyje taip sudarydamos didesnes daleles – granules.

Naudojamos medžiagos.

Granuliavimo metu dažniausiai naudojamos medžiagos: grynas vanduo arba skystas rišiklis, kietas rišiklis, kaip cementas ar kalkės, ir užpildomoji medžiaga, kuri dažniausiai būna smulkiai sumalta neorganinė kilmės atlieka arba smulki organinė medžiaga [28].

Naudojami prietaisai.

Šiuo atveju dirbtinio užpildo gamyboje naudotas prietaisas – diskinis granulatorius (žr. 21 pav.). Pagrindiniai diskinio granulatoriaus parametrai: vidinis disko skersmuo – 500 mm., disko sienelės aukštis – 100mm, mentelės aukštis – 100 mm, mentelės plotis – 175 mm, užpildo granuliavimo metu nustatytas disko pasvirimo kampas – 45°, apsisukimų skaičius priklauso nuo granuliavimui naudojamų medžiagų.

Technologijos aprašymas.

Gaminant užpildą pirmiausia atskirame inde sumaišomos kietosios užpildo sudedamosios dalys, tuomet jos suberiamos į granuliavimo prietaisą. Toliau prietaisas įjungiamas ir mažomis dozėmis pilamas vanduo. Vanduo gali būti purškiamas arba pilamas iš matavimo kolbos ant mišinio. Po maždaug 1 minutės užpildas pradeda granuliuotis, matant, jog užpildas per birus pilama arba purškiama daugiau vandens. Vandens kiekis granulatoriuje turi įtakos užpildo granulės dydžiui, norint išgauti mažesnio dydžio daleles naudojama mažiau vandens, norint išgauti didesnio dydžio granules pilama daugiau, tačiau verta atsižvelgti į vandens ir rišiklio santykį. Galiausiai esant tinkamam granulės dydžiui ir formai prietaisas išjungiamas, o užpildai švelniai perkeliama ant paviršiaus ir praskaidomi, kad vienas su kitu nesiliestų ir nesukibtų.



20 pav. Diskinis granulatorius ir jame granuliuojamas užpildas.

3.2. Betono mišinio paruošimas

Betono mišiniams paruošti buvo naudoti sugranuliuoti dirbtiniai užpildai, smulkūs užpildai, cementas ir vanduo, visi šie komponentai buvo dozuojami pagal masę. Visi betono mišiniai sumaišomi ranka.

3.3. Betono mišinio formavimas

Norint ištirti sukietėjusio betono bandinio parametrus buvo suformuotos prizmelės, kurių matmenys 40×40×160 mm. Supiltas į formas betono mišinys buvo tankinamas 2 minutes rankiniu būdu. Matoma formelės pusė buvo uždengiama stiklu. Bandiniai išformuojami po 24 valandų.

3.4. Cemento hidratacijos tyrimas

Šiuo bandymu buvo norima sužinoti kaip greitai sureaguoja naudojami dirbtinių užpildų mišiniai ir ar juose nėra hidratacijos intensyvumą ir greitį mažinančių medžiagų, taip pat buvo norima sužinoti kokie yra skystos tešlos kietėjimo parametrai. Šiam metodui atlikti buvo naudojamas pusiau adiabatinis kalorimetras. Bandymas buvo atliekamas pagal LST EN 196-9:2010 standartą.

3.5. Granulimetrinė analizė

Užpildų dalelės dydžio nustatymo bandyme buvo naudojami sietai, kurie atitinka ISO 3310-2:2013 standarto reikalavimus, eksperimentas atliekamas pagal LST EN 933-1:2012 standarto reikalavimus. Bandyme buvo naudojami šių akutės dydžių sietai: 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 μm, 250 μm, 125 μm, 63 μm. Suminis užpildo kiekis buvo sveriamas prieš ir po granuliavimo. Sugranuliuotus užpildus, ant kiekvieno sieto likusių užpildų kiekis buvo pasveriamas. Šis procesas buvo atliekamas po 3 kartus su kiekvienu bandiniu, tuomet sudaromi dalinės ir suminės liekanų grafikai.



21 pav. Sietai naudoti bandyme.

3.6. Optinė mikroskopija

Dirbtinių užpildų defektams aptikti buvo naudojamas optinis mikroskopas „BRESSER Researcher LCD“. Užpildai buvo perskeliami perpus ir stebimas viduje esančių defektų, porų kiekis.

3.7. Piltinio tankio nustatymas

Piltinis tankis buvo nustatomas vadovaujantis LST EN 1097-6:2022 standarto reikalavimais. Užpildai buvo supilami į 1000ml indą, virš indo likę užpildai nubraukiami, tuomet inde esantis turinys pasveriamas. Užpildų piltinis tankis apskaičiuojamas pagal 2.2.7.1 formulę.

$$\rho_{pilt} = \frac{m_{užp}}{V_{ind}}; \quad (2.2.7.1)$$

čia:

ρ_{pilt} – užpildo piltinis tankis, kg/m³;

$m_{užp}$ – užpildo masė inde, kg;

V_{ind} – indo tūris, m³.

3.8. Vandens įgeriamumo nustatymo bandymas

Bandinių vandens įgeriamumo bandymas buvo atliekamas pagal LST EN 1097-5:2008 ir LST EN 1097-6:2022 standartų pateiktą metodiką. Suformuotos prizmelės ir atskiri dirbtiniai užpildai buvo įdedami į laboratorinę krosnelę, kur 115 °C temperatūroje buvo džiovinami 24 valandas. Atvėsus bandiniams buvo pamatuojamas sausas jų svoris. Bandiniai buvo drėkinami 48 valandas, o jų svoris buvo matuojamas keturiais intervalais: po 15 min, 1 h, 24 h, 48 h nuo įdėjimo į vandenį, po 48 valandų pasvertas ir bandinių svoris vandenyje (**žr. 23 pav.**).

Absoliutinio ir santykinio drėgno apskaičiavimas pateiktas 2.2.6.1 ir 2.2.6.2 formulėse:

$$w_a = \frac{W}{G_s} \cdot 100\% = \frac{G_{šlap.} - G_{saus.}}{G_{saus.}}; \quad (2.2.6.1)$$

$$w_s = \frac{W}{G} \cdot 100\% = \frac{G_{šlap.} - G_{saus.}}{G_{šlap.}}; \quad (2.2.6.2)$$

čia:

w_a – absoliutinis drėgnis, %.

w_s – santykinis drėgnis, %.

$G_{šlap.}$ – drėgno bandinio masė, g.

$G_{saus.}$ – sauso bandinio masė, g.



22 pav. Bandinio svorio vandenyje nustatymas.

3.9. Atsparumo šalčiui bandymas

Prizmelės tikrinamos vienpusio šaldymo metodu pagal LST 1428-19:2016 standarto reikalavimus. Prizmelės pamerkiamos į atskiras talpas su 3 % koncentracijos valgomosios druskos (NaCl) tirpalu, apsemiant bandinį apie 1/3 bandinio aukščio. Šaldymo kameros ciklo trukmė ($24 \pm 0,25$) h. Bandinys buvo tikrinamas kas 7 ciklus ir žiūrima ar ant prizmelės paviršiaus aptinkama irimo požymių.

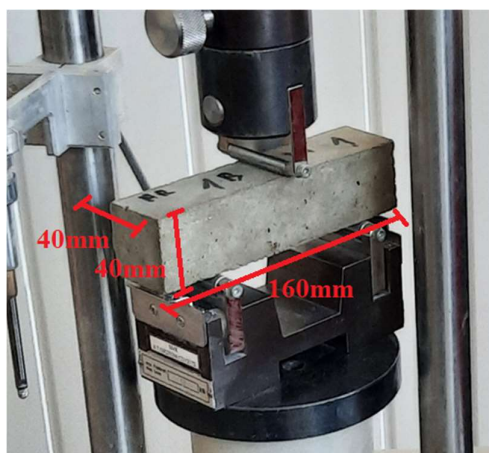
Papildomai buvo tikrinamas ir atskiro dirbtinio užpildo atsparumas šalčiui. Granulės buvo pasveriamos ir išmatuojamas jų paviršiaus plotas, tuomet sudedamos į atskiras talpas su 3 % koncentracijos valgomosios druskos (NaCl) tirpalu visiškai apsemiant granules. Jos buvo laikomos 28 ciklus, tuomet granulės išimamos ir įdedamos į krosnelę 48 valandoms $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ išdžiovinimui. Išdžiovinus užpildus buvo pasveriamas nubykęsios dalies masė.

3.10. Susitraukimo deformacijų matavimas

Betono susitraukimo deformacijų matavimas atliekamas vadovaujantis LST EN 12390-16:2019 standartu. Pradinės betono susitraukimo deformacijos buvo nustatytos po 16 valandų nuo mišinio užmaišymo pradžios. Susitraukimo deformacijoms matuoti buvo suformuotos $40 \times 40 \times 160$ mm prizmelės formos bandiniai. Išformuoti bandiniai buvo laikomi laboratorijos sąlygomis. Matavimai atlikti skaitmeniniu indikatoriumi „Helios-Preisser 1724 502“. Pagrindinės indikatoriaus savybės : matavimo skalė 0 – 12,5 mm, tikslumas – 0,001 mm, prietaisas tenkina LST EN 12617-4:2003 standarto reikalavimus.

3.11. Bandinio lenkiamojo stiprio nustatymas

Lenkiamasis stipris nustatomas pagal LST EN 12390-5:2009 standartą. Lenkiamajam stipriui nustatyti buvo naudojamos $40 \times 40 \times 160$ mm matmenų prizmelės (žr. 24 pav.). Lenkiamasis stipris buvo nustatytas po 7 parų. Prieš bandymą nelygūs prizmelės paviršiai buvo nušlifuojami ranka, o bandinių paviršių lygiagretumas patikrintas pagal LST EN 12390-1:2012. Lenkimo bandymo metu buvo naudojamas presas, kurio maksimali ašinė jėga – 100kN.



23 pav. Bandinio lenkiamojo stiprio nustatymas.

3.12. Bandinio gniuždomojo stiprio nustatymas

Gniuždomasis stipris nustatomas pagal LST EN 12390-4:2003 standartą. Gniuždymo bandymui buvo naudotos lenkimo bandyme sulenktos prizmelės. Virš ir po prizmelėmis buvo padėtos 60x40 mm matmenų plokštelės, toks bandinio plotas buvo gniuždomas. Gniuždymo bandymo metu buvo naudojamas presas, kurio maksimali ašinė jėga – 600kN.



24 pav. Bandinio gniuždomojo stiprio nustatymas.

4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

4.1. Stiklo atliekos paruošimas

Eksperimentams atlikti buvo naudojamos įvairios komunalinių atliekų stiklo taros ir talpos. Šis stiklas buvo sumalamas iki smulkios dalelės dydžio. Prieš sumalant atlieką, ji buvo nuplaunama ir išvaloma, etiketės nuplėšiamos, o ant taros likę klijų likučiai pašalinami.



25 pav. Malto stiklo paruošimo technologija (1 – atliekos surinkimas; 2 – ant stiklo esančių nešvarumų pašalinimas; 3,4 – rutulinio malūno ir malimo rutulių paruošimas darbui; 5 – atliekos ir rutulių sudėjimas į malūną; 6 – žaliavos gavimas) (sudaryta autoriaus).

Eksperimentams naudojamas maltas stiklas buvo gaminamas rutuliniu malūnu. Naudoto rutulinio malūno techninės charakteristikos: išorinis būgno skersmuo – 700 mm, išorinis būgno ilgis – 520 mm, malimo rutulio skersmuo – 60 mm, malimo rutulio masė – 1,0 kg, smulkios žaliavos gavimui buvo naudojami 130 malimo rutulių. Kiekvieno malimo metu buvo sudedama apie 5 kg stiklo atliekos. Vieno malimo trukmė – 2 valandos.

Pagrindinės malto stiklo fizikinės savybės: savitasis tankis 2528 kg/m^3 , savitasis paviršius $334,8 \text{ m}^2/\text{kg}$.

4.2. Malto stiklo ir gesintų kalkių poveikis cemento hidratacijos procesui

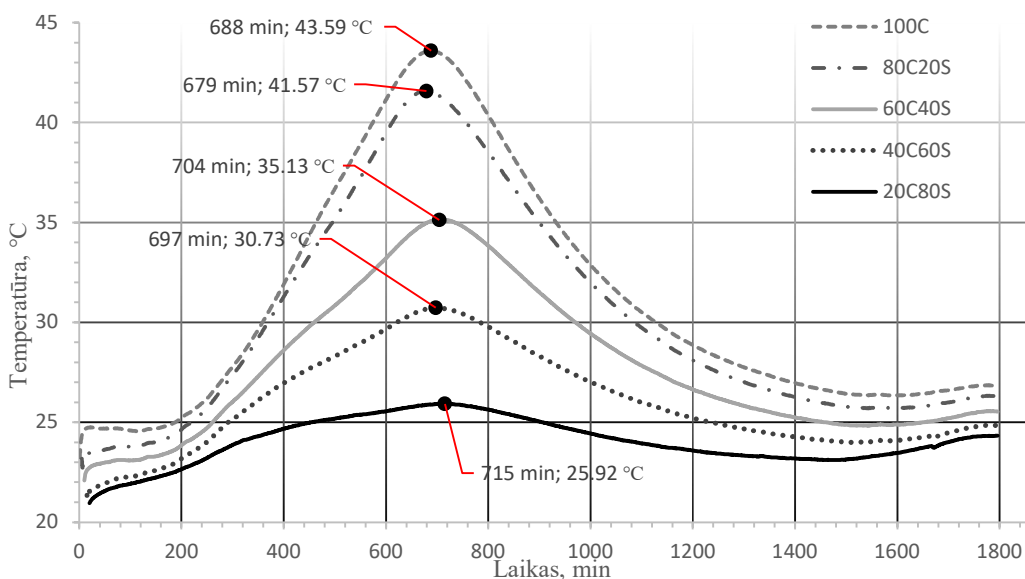
Atlikus šį bandymą buvo išsiaiškinta kaip greitai įvyko hidratacijos procesas skirtingiems rišikliams reaguojant su vandeniu ir įvertinta ar maltas stiklas įtakoja hidratacijos intensyvumą ir mažina reakcijos greitį. Šiam metodui atlikti buvo naudojamas pusiau adiabatinis kalorimetras.

7 lentelė Pusiaus adiabatinio kalorimetro metodui naudotos bandinių sudėtys.

Santrumpa	Bandinio sudėtis	Santrumpa	Bandinio sudėtis
100C	100% cemento	80C20K	80% cemento 20% hidraulinių kalkių
80C20S	80% cemento 20% malto stiklo	60C40K	60% cemento 40% hidraulinių kalkių
60C40S	60% cemento 40% malto stiklo	40C60K	40% cemento 60% hidraulinių kalkių
40C60S	40% cemento 60% malto stiklo	20C80K	20% cemento 80% hidraulinių kalkių
20C80S	20% cemento 80% malto stiklo		

Pirmiausia buvo testuojami mišiniai turintys tik malto stiklo. Maišant skirtingomis dalimis maltą sticlą ir rišiklį (šiuo atveju cementą) buvo išsiaiškintas optimaliausias malto stiklo kiekis. Analizuojant grafiką matoma (žr. 26 pav.) kad cemento hidratacijos pabaiga santykinai panaši su kiekvienu bandiniu įvertinus ir laiko skirtumą tarp tešlos užmaišymų. Tarp pavyzdinio bandinio, kurio sudėtis buvo 100% cemento ir tarp sudėties su 20% cemento ir 80% malto stiklo matomas tik 27 minučių tarpas hidratacijos pabaigos, tai leidžia teigti, jog naudotas maltas stiklas buvo pakankamai švarus ir be priemaišų.

Verta paminėti, kad 26 paveiksle pavaizduotame grafike temperatūros skirtumas nėra tiesiškai kintantis, nors tarp skirtingų bandinių sudėčių kiekio buvo išlaikoma tiesinė priklausomybė. Tikėtina, jog taip yra dėl netinkamai išmaišyto mišinio ar dėl skirtingos termoporos vietos bandinių viduje.

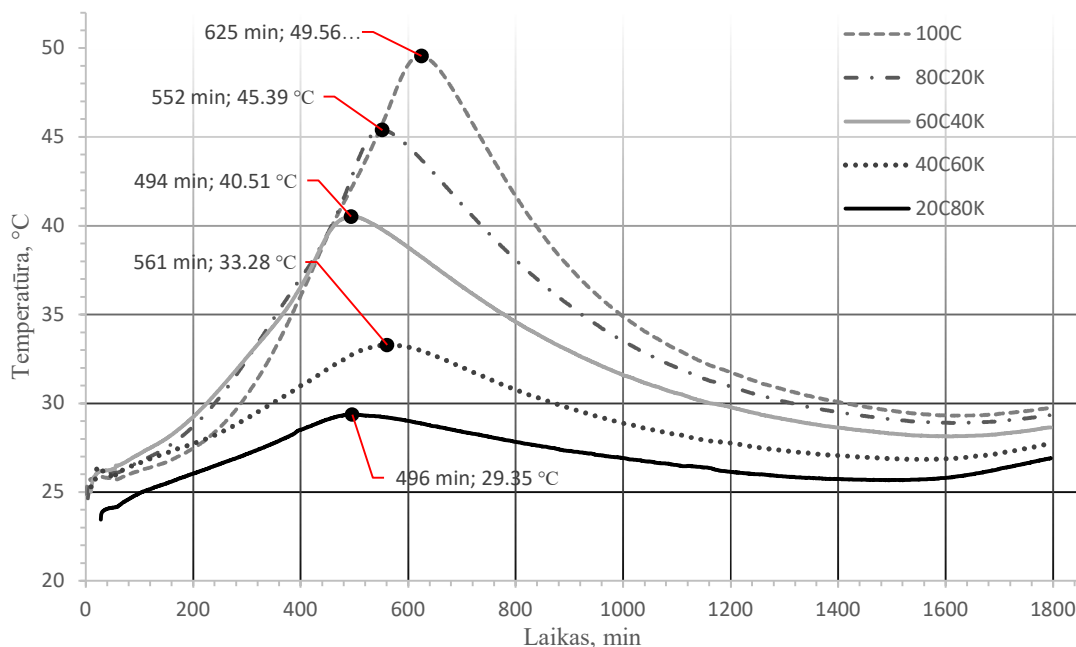


26 pav. Skirtingų stiklo ir cemento kiekio santykių hidratacija.

Tuo tarpu žiūrint į grafiką kuomet buvo fiksuojamas hidraulinių kalkių ir cemento hidratacijos procesas matoma (žr. 27 pav.) kad rišiklio hidratacijos pabaiga labiau chaotiška nei palyginus su 43 paveiksle analizuotu grafiku įvertinus ir laiko skirtumą tarp tešlos užmaišymų. Tarp pavyzdinio bandinio, kurio sudėtis buvo 100% cemento ir tarp sudėties su 20% cemento ir 80% hidraulinių kalkių

matomas 129 minučių tarpas tarp hidratacijos pabaigos, tai leidžia teigti, jog naudojant hidraulinės kalkės rišklio kietėjimo laikas sutrumpėja.

Stebint bandymo temperatūrų pokyčius matoma, kad temperatūros skirtumai keičiasi tolygesniais intervalais nei prieš tai nagrinėtame grafike, tarp naudotų sudėčių pastebimas temperatūrų skirtumas yra tarp 5 - 7 °C.



27 pav. Skirtingų stiklo ir hidraulinių kalkių kiekio santykių hidratacija.

4.3. Granuliavimas

Granuliavimo proceso metu buvo pagaminti 3 skirtingų sudėčių dirbtiniai užpildai (žr. 8 lentelę). Granuliavimas prasidėjo nuo skirtingų medžiagų susvėrimo, tuomet visos medžiagos buvo sudedamos į vieną talpą ir sumaišomas sausas mišinys, toliau mišinys supilamas į granuliatorių ir įjungiamas granuliavimo prietaisas. Vanduo buvo patiekiamas dozatoriumi, purškama tol, kol mišinys susiformuos į didesnes daleles, esant pakankamam dalelių dydžiui granulatorius buvo išjungiamas, o užpildai išimami ir atsargiai suberiami ant kieto pagrindo. Po gamybos proceso užpildai buvo sandėliuojami ne mažiau kaip 28 paras.

8 lentelė Dirbtinių užpildų gamybai naudotas medžiagų kiekis kg/m³.

Nr.	Santrumpa	Bandinys	Cementas, kg/m ³	Kalkės, kg/m ³	Maltas stiklas, kg/m ³	Vanduo, kg/m ³
1.	C100	100% cemento	1350,0	-	-	610,0
2.	C20S80	20% cemento 80% malto stiklo	270,0	-	2022,4	610,0
3.	C5K15S80	5% cemento 15% gesintų kalkių 80% malto stiklo	67,5	82,5	2022,4	610,0

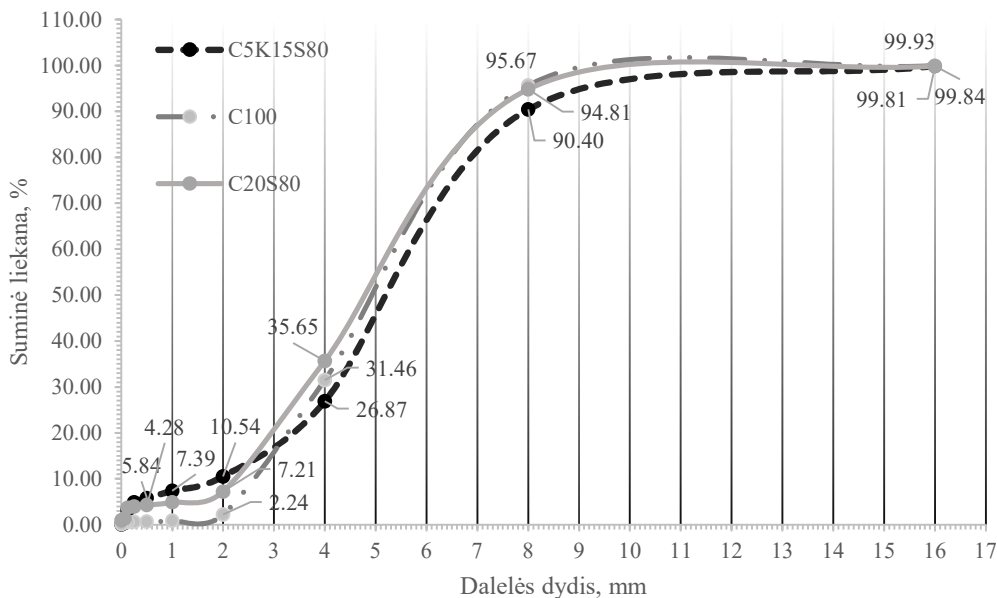


28 pav. Granuliatoriumi pagaminti dirbtiniai užpildai (Nr.1 – C100, Nr.2 – C20S80, Nr.3 – C5K15S80).

4.4. Dirbtinių užpildų granulimetrinė analizė ir piltinis tankis.

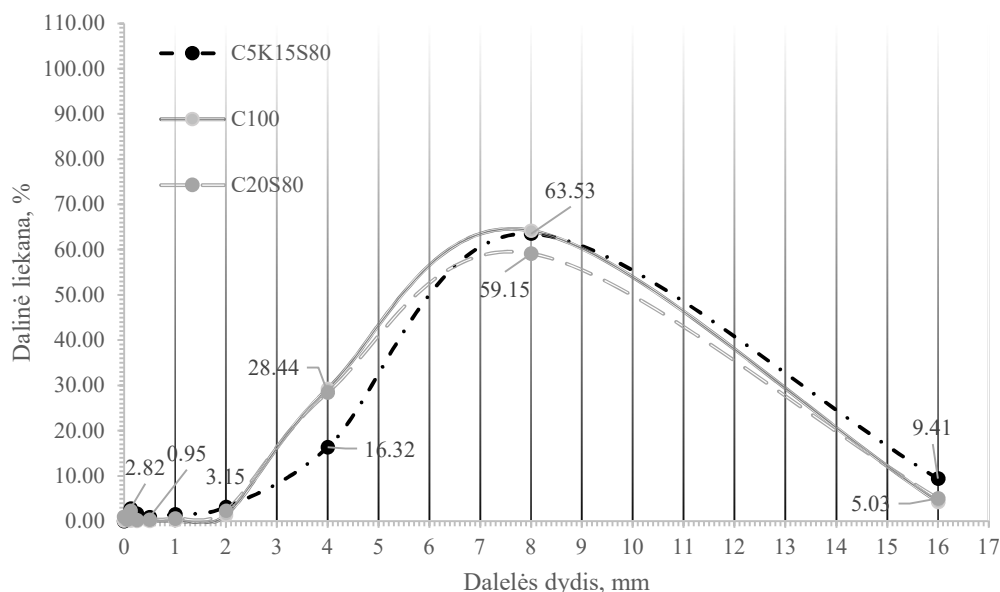
Granulimetrijos eksperimento, naudojant sietus, metu buvo ištirta koks yra kiekvienos sudėties dirbtinio užpildo dalelės dydis ir pagamintų užpildų skirtingo dydžio dalelių pasiskirstymas visame bandinyje. Kiekvieno bandinio granulimetrinė sudėtis pavaizduota grafiškai. Papildomai buvo nustatytas ir užpildų piltinis tankis, jis pavaizduotas 9 lentelėje.

Iš 29 ir 30 paveikslų pavaizduotų grafikų matyti, jog naudojant užpildą, kuriame cementas sudarė 100% masės (C100) pasiskirstymas pagal dalelės dydį atitinka stambaus užpildo sąvoką pagal LST EN 12620:2003+A1:2008 standartą. Dalelių, kurių dydžiai yra 0/2 mm sudaro tik 2,24 % bendro užpildo kiekio. Tuo tarpu dalelės, kurių dydžiai yra 2/8 mm sudaro 94,3 % suminio užpildo kiekio. Iš dalinės liekanos kreivės galime matyti, jog didžiausią užpildo dalį sudaro dalelės, kurių dydis yra 16/8 mm, jos sudaro 64,20 %. Verta paminėti, jog net 4,26 % sudaro dalelės, kurių dydis yra didesnis nei 16 mm.



29 pav. Dirbtinių užpildų suminės liekanos kreivės.

Analizuojant užpildo C20S80 grafike pavaizduotą suminės liekanos kreivę dalelių, kurių dydžiai 0/2 mm sudaro 7,21 % suminio užpildo kiekio. Tuo tarpu dalelės, kurių dydžiai yra 2/8 mm sudaro 87,6 % suminio užpildo kiekio. Iš dalinės liekanos kreivės galime matyti, jog didžiausią užpildo dalį sudaro dalelės, kurių dydis yra 16/8 mm, jos sudaro 59,15 %. Dalelės, kurių dydis viršija 16mm sudaro 5,03 %. Vadovaujantis LST EN 12620:2003+A1:2008 standartu šis bandinys yra priskiriamas stambiam užpildui.



30 pav. Dirbtinių užpildų dalinės liekanos kreivės.

Analizuojant grafike pavaizduotą bandinio C5K15S80 suminės liekanos (29, 30 pav.) kreivę matomas aiškus dalelių, kurių dydis 0/2mm padidėjimas, jis sudaro 10,54 % suminio užpildo kiekio. Dalelės, kurių dydžiai yra 2/8 mm sudaro 79,86 % suminio užpildo kiekio. Stebint dalinės liekanos kreivę galima matyti, jog didžiausią užpildo dalį sudaro dalelės, kurių dydis yra 8/16 mm, jos sudaro 63,53 %. Dalelės, kurių dydis viršija 16 mm sudaro 9,41 %. Vadovaujantis LST EN 12620:2003+A1:2008 standartu šis bandinys gali būti priskiriamas stambiam užpildui.

9 lentelė Dirbtinių užpildų piltnis tankis.

Bandinys	Piltinis tankis, kg/m ³
Nr.1 (C100)	1478,25
Nr.2 (C20S80)	1002,63
Nr.3 (C5K15S80)	938,11

Išanalizavus visų dirbtinių užpildų granulimetrinę sudėtį matoma, jog naudojant maltą stiklą ir kalkes smulkių nuobirų kiekis didėja, toks smulkios frakcijos didėjimas gali būti dėl mažesnio panaudoto stipraus rišiklio, šiuo atveju cemento kiekio. Svarbu paminėti, jog kiekvieno užpildo pasiskirstymas pagal dalelės dydį yra ganėtinai panašus, didžiausią užpildų dalį sudaro 8/16 mm dydžio granulės, kurių dalinė liekana varijuoja nuo 59,15 % iki 64,20 %.

4.5. Dirbtinių užpildų vizualinė analizė.

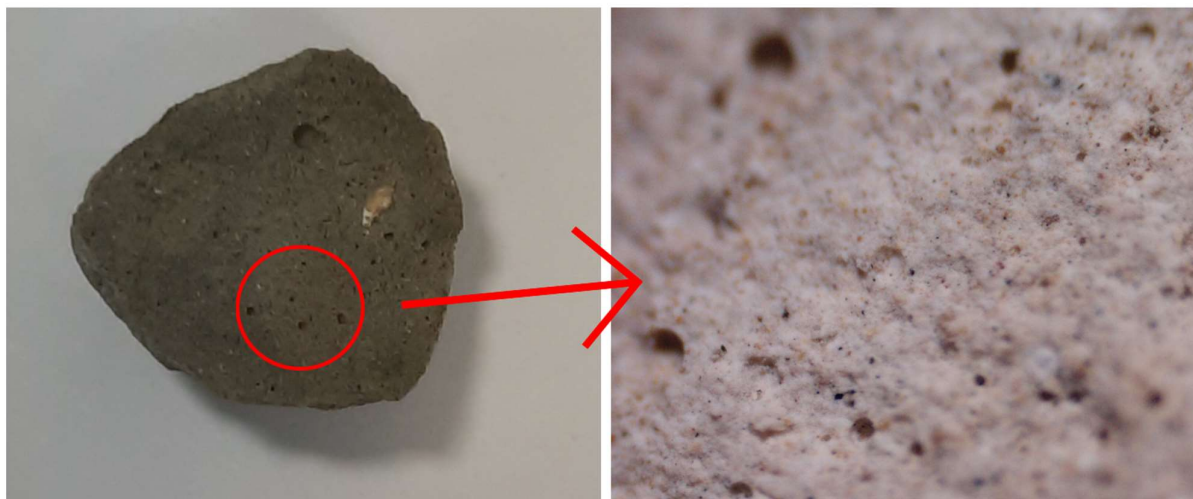
Vizualinei analizei atlikti buvo naudojamas optinis mikroskopas, šios analizės metu buvo galima ištirti granulių paviršius ir skerspjūvis, aptikti defektus ir netobulumus užpildo viduje.

Analizuojant pirmąją bandinio (žr. **31 pav.**) sudėtį galima matyti, jog naudojant tik rišiklį (cementą) ant skerspjūvio paviršiaus matomas tik mažas kiekis porų, taip pat ir nedidelis kiekis priemaišų. Spėjama, jog baltos dėmės ant granulių yra negesintos kalkės ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).



31 pav. Dirbtinio užpildo Nr.1 (C100) skerspjūvis.

Tuo tarpu antrojo dirbtinio užpildo skerspjūvyje (žr. **32 pav.**) matomas didesnis kiekis nevientisumų ir taip pat ir porų kiekio užpildo plote padidėjimas. Šie nevientisumai galėjo pasireikšti dėl malto stiklo nesusimaišymo su cementine tesla, arba dėl stiklo esančių šiukšlių.



32 pav. Dirbtinio užpildo Nr.2 (C20S80) skerspjūvis.

Trečiojo dirbtinio užpildo skerspjūvyje pastebėtas didžiausias defektų kiekis pasiskirstęs per granulės skerspjūvį (žr. **33 pav.**) Šio užpildo viduje esančios tuštumos yra daug didesnės ir jų forma netolygi palyginus su ankstesniais užpildais. Verta paminėti, jog šio užpildo nevientisumų aptikta mažiau, iš to galima daryti prielaidą, kad užpildo mišinys susimaišė tolygiau nei anksčiau paminėtų užpildų.



33 pav. Dirbtinio užpildo Nr.3 (C5K15S80) skerspjūvis.

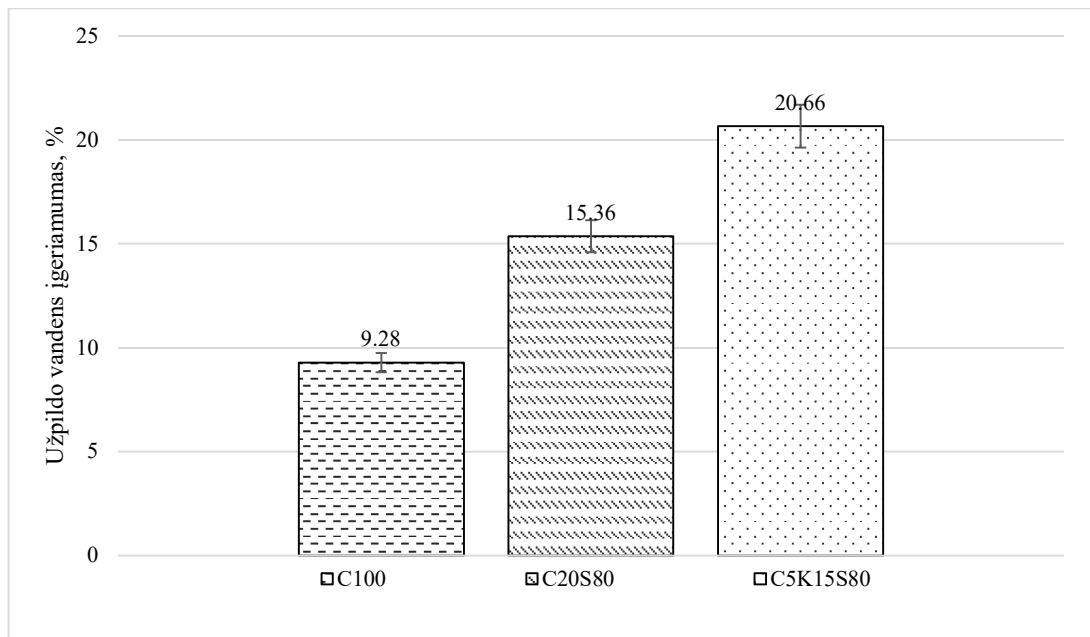
Atlikus vizualinę analizę galima teigti, jog užpildų sandaroje yra daug netobulumų, kurie gali atsirasti dėl kelių priežasčių, tokių kaip: skirtingų medžiagų naudojimas užpilduose ir jų kokybė, neteisinga granuliacijos technologija bei sunaudojamas vandens kiekis. Šių defektų įtaka gali sumažinti užpildų mechaninį stiprumą ir ilgalaikiškumą, todėl gaminant šiuos užpildus verta atlikti granulių defektoskopinę analizę.

4.6. Vandens įgeriamumo bandymo rezultatai

Vandens įgeriamumo bandymas buvo atliekamas su pagamintais užpildais ir prizmelėmis. Bandiniai buvo džiovinami krosnelėje 24h tada merkami į vandenį, po tam tikro laiko intervalo išimami, paviršiai nusausinami, tuomet bandiniai pasveriami tuomet apskaičiuojamas absoliutinis bei santykinis drėgnumas, o rezultatai surašomi į **10 lentelę**.

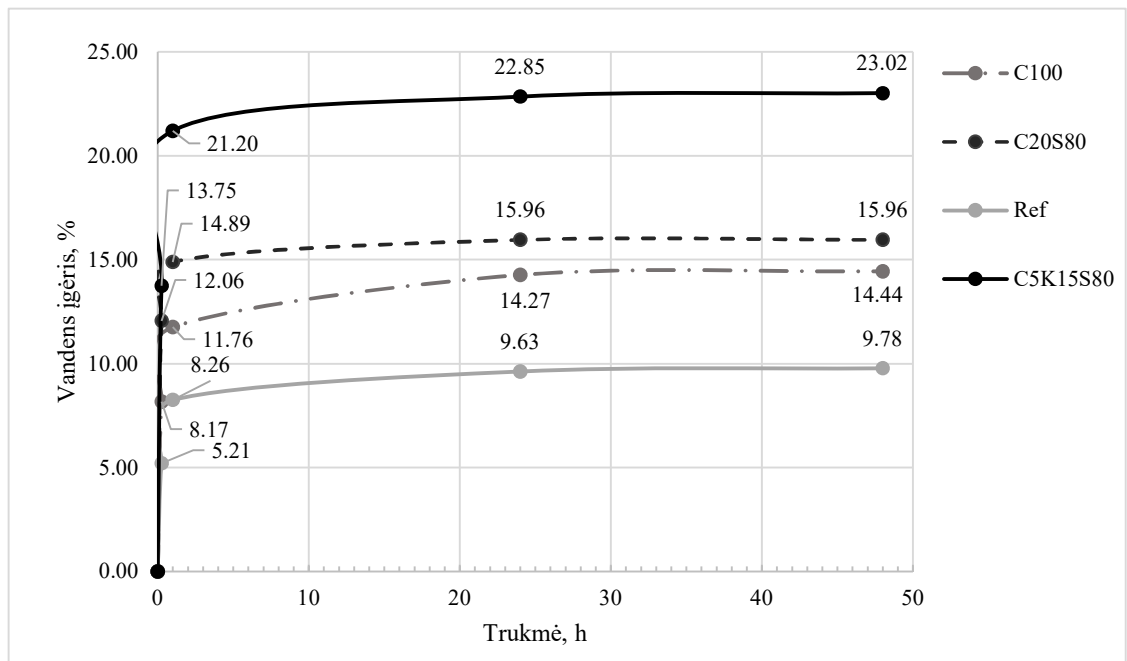
10 lentelė Dirbtinių užpildų įgeriamumas.

Užpildai	Sauso užpildo masė, g	Drėgno užpildo masė, g. (po 48 h.)	Užpildo įgeriamumas, %
C100	83,64	91,40	9,28
C20S80	89,16	102,86	15,36
C5K15S80	86,38	104,23	20,66



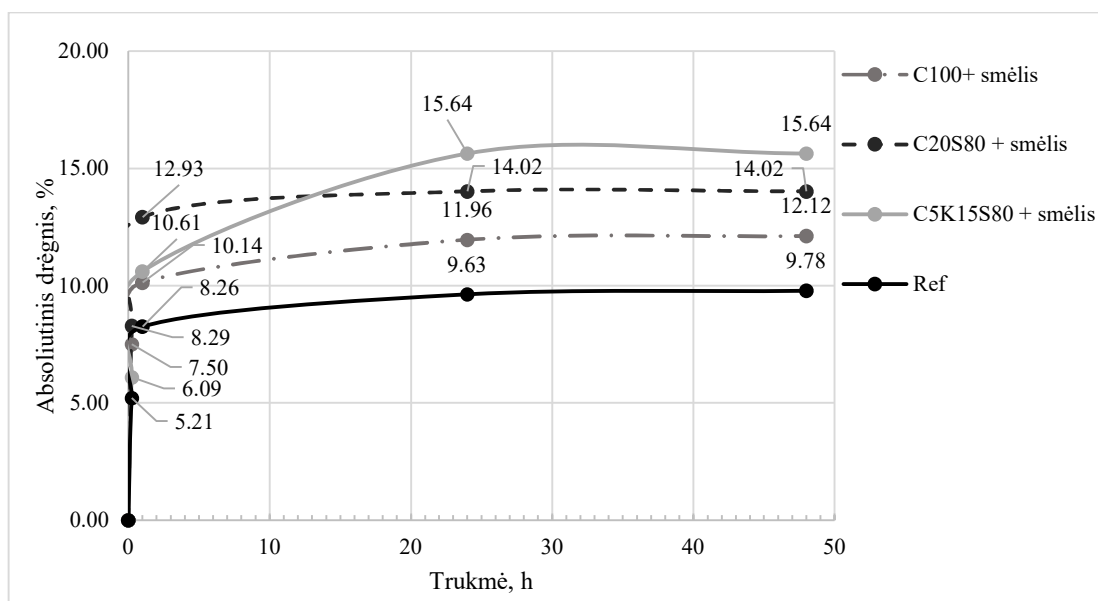
34 pav. Dirbtinių užpildų įgėris.

Nagrinėjant užpildo įgeriamumą matoma, jog C5K15S80 užpildas įgeria daugiausiai vandens (20,66 %) palyginus su C20S80 (15,36 %) ir C100 (9,28 %) užpildais, tai leidžia teigti, kad kalkės ir maltas stiklas didina užpildo įgeriamumą. Įdomu tai, jog C5K15S80 užpildo įgeriamumas padidėja net 5,3% palyginus su C20S80 užpildu, iš to galima daryti prielaidą, kad naudojant dirbtiniuose užpilduose hidraulinės kalkės žymiai padidina jo vandens įgeriamumą.



35 pav. Prizmelių su dirbtinių užpildu vandens įgėris.

Nagrinėjant prizmelių be smulkaus užpildo vandens įgeriamumą (žr. 35 pav.) matoma, kad daugiausia įgeria kaip ir 9 lentelėje nagrinėtu atveju prizmelė su C5K15S80 užpildu, toliau seka prizmelė su C20S80, C100 ir pavyzdinis bandinys. Tačiau įdomu tai, jog prizmelė santykinai įgėrė daugiau vandens nei pats užpildas, tai pastebima ir su kitomis prizmelėmis.



36 pav. Prizmelė su dirbtiniu užpildu ir smėliu vandens įgeris.

Tuo tarpu prizmelėse kur buvo naudotas smulkus užpildas absoliutinis drėgnis pastebimas mažesnis (žr. 36 pav.) matoma, kad daugiausia įgeria kaip ir 10 lentelėje, bei 36 paveiksle nagrinėtu atveju prizmelė su C5K15S80 užpildu, toliau seka prizmelė su C20S80, C100 ir pavyzdinis bandinys. Galima daryti prielaidą, kad smulkaus užpildo (smėlio) panaudojimas gaminiuose sumažina gaminių įgeriamumą vandeniui.

4.7. Dirbtinio užpildo atsparumas šalčio ardomajam poveikiui

Atsparumo šalčiui bandymas buvo atliktas su dirbtiniu užpildu ir prizmelėmis. Dirbtinis užpildas buvo išimtas po 28 parų, išdžiovinamas ir apskaičiuojamas santykinis užpildo nubyrejimas, tuomet viskas surašoma į 11 lentelę, vizuali nubyrejusi užpildo dalis matoma 37, 38, 39 paveiksluose. Bandymo metu buvo apžiūrimos prizmelės ir ieškoma pažaidų ant jos paviršiaus.

11 lentelė Dirbtinių užpildų atsparumo šalčiui bandymo rezultatai (po 28 parų).

Užpildas	Viso sauso užpildo masė, g.	Nubyrejusios dalies masė po 28 parų, g.	Nubyrejimas, %
C100	123,68	0,31	0,25
C20S80	105,83	6,76	6,39
C5K15S80	112,45	16,68	14,83

Iš 11 lentelėje pateiktų duomenų matoma kad užpildo kurio sudėtis yra C100 nubyrejimas siekia vos 0,25%, tuo tarpu C20S80 ir C5K15S80 užpildų nubyrejimas yra ganėtinai didesnis, atitinkamai 6,39 % ir 14,83 %. Tikėtina, kad toks didelis nubyrejimas yra dėl mažo cemento kiekio panaudojimo.

4.8. Betono bandinių atsparumo šalčiui rezultatai

Bandymo metu buvo apžiūrimos prizmelės ir ieškoma pažaidų ant jos paviršiaus.



37 pav. Kairėje prizmelė C100 be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė C100 su smulkiu užpildu .

Analizuojant bandinius su C100 užpildu nebuvo pastebėta jokių pažaidų, kurios būtų atsiradusios ant prizmelių sienelių dėl šaldymo ir šildymo ciklų palyginus su prizmelėmis prieš bandymą. 28 ciklų šaldymo ir atšildymo skaičius buvo nepakankamas nustatyti jokiems irimo požymiams.



38 pav. Kairėje prizmelė C20S80 be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė C20S80 su smulkiu užpildu .

Analizuojant bandinius su C20S80 užpildu taip pat nebuvo pastebėta jokių pažaidų, kurios būtų atsiradusios ant prizmelių sienelių dėl šaldymo ir šildymo ciklų palyginus su prizmelėmis prieš bandymą. Norint pastebėti irimo požymius bandinius reikėtų tikrinti po didesnio ciklų skaičiaus.



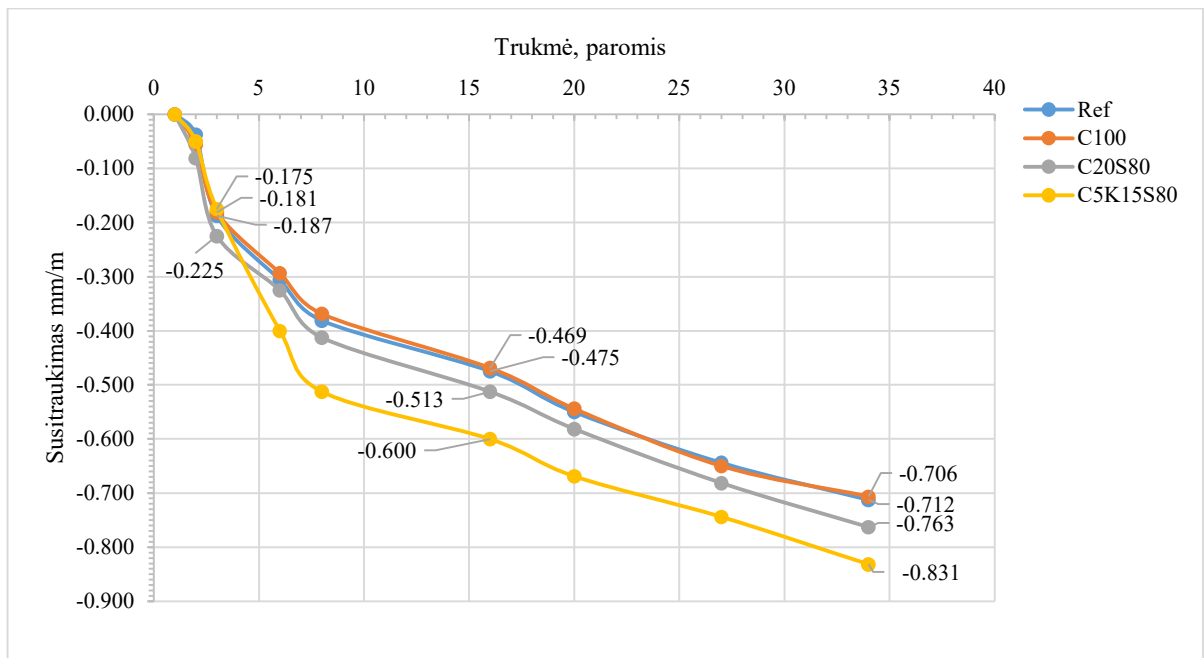
39 pav. Kairėje prizmelė C5K15S80 be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė C5K15S80 su smulkiu užpildu.

Bandiniuose su C20S80 užpildu taip pat nebuvo pastebėta jokių pažeidimų, kurios būtų atsiradusios ant prizmelių sienelių dėl šaldymo ir šildymo ciklų palyginus su prizmelėmis prieš bandymą. Norint pastebėti irimo požymius bandinius reikėtų tikrinti po didesnio ciklų skaičiaus. Įdomu tai, jog bandant tik užpildą buvo pastebimas 14,83 % nubyrėjimas nuo visos užpildo masės. Galima daryti prielaidą, jog cemento mišinys apsaugo dirbtinį užpildą nuo šaldymo ir šildymo ciklų poveikio.

4.9. Dirbtinio užpildo įtaka bandinių susitraukimo deformacijai

Pradinės betono susitraukimo deformacijos buvo nustatytos po 16 valandų nuo mišinio užmaišymo pradžios, tolimesni matavimai buvo atliekami kas 1-7 dienas.

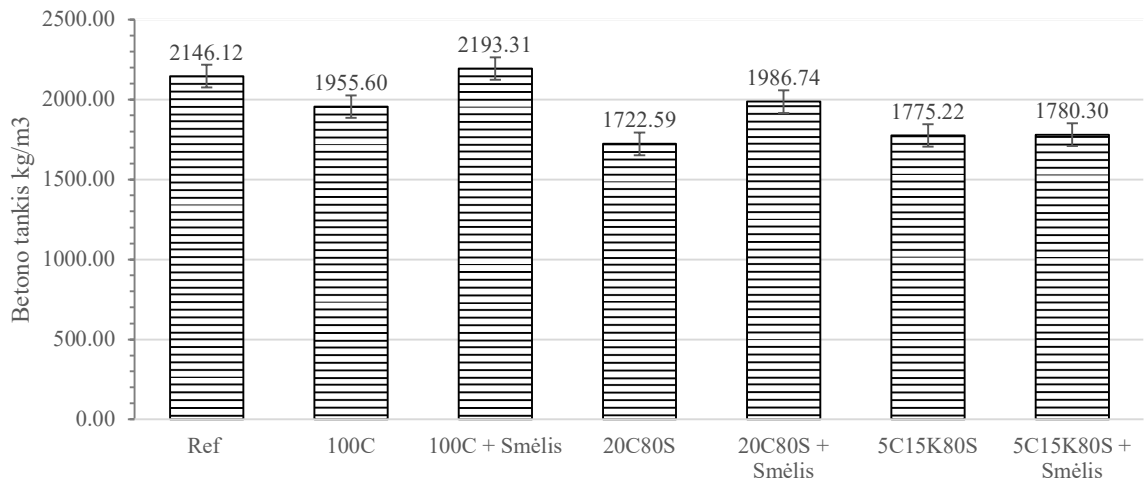
Analizuojant deformacijų kreivę (**žr. 40 pav.**) galima matyti ties C100 ir pavyzdinio bandinių deformacijų skirtumas po 34 dienų yra $-0,006$ mm/m, tikėtina kad tokios panašios šių bandinių susitraukimo deformacijos vyksta dėl panašios prizmelių sudėties, kadangi šiuose bandiniuose nebuvo naudojami maltas stiklas ir hidraulinės kalkės, o vandens ir cemento santykis buvo išlaikytas vienodas. C20S80 bandinio susitraukimo deformacijų kreivėje pastebimas tolygus deformacijų didėjimas kur 34 dieną deformacijos siekė $-0,763$ mm/m, tačiau palyginus su C100 ir pavyzdiniu bandiniu šios deformacijos yra didesnės ir po 34 dienų šis skirtumas vyrauja tarp $-0,051$ mm/m ir $-0,53$ mm/m, tikėtina kad toks susitraukimo deformacijų padidėjimas atsiranda dėl bandinyje esančio malto stiklo. Tuo tarpu C5K15C80 bandinyje matomos didžiausios susitraukimo deformacijos ($-0,831$ mm/m) ir palyginus su C100 ir pavyzdiniu bandiniais matomas skirtumas atitinkamai $-0,119$ mm/m ir $-0,122$ mm/m. Tikėtina jog šiame bandinyje didžiausios susitraukimo deformacijos pastebimos dėl mažesnio cemento kiekio panaudojimo kuris siekė vos 5%, tačiau toliau analizuojant kreivę matomi jos lūžiai ties 6 ir 16 dienomis, manoma jog tai turėjo įtakos mišinyje esančios hidraulinės kalkės, kadangi kitose kreivėse panašių lūžių nepastebėta.



40 pav. Bandinių susitraukimo deformacijų kreivės.

4.10. Bandinių gniuždomojo ir lenkiamojo stiprių nustatymo rezultatai.

Dirbtinio užpildo mechaniniam stiprumui nustatyti buvo gaminamos 160x40x40 mm matmenų prizmelės, kurių sudėtyje yra dalis pagaminto dirbtinio užpildo. Papildomai buvo gaminamos prizmelės, kuriose kartu kaip smulkus užpildas panaudotas 0/2 mm dalelės dydžio smėlis. Prieš bandymą buvo išmatuojami kiekvienos prizmelės geometriniai parametrai ir svoris, tuomet suvedamas vienodų bandinių rezultatų vidurkis, bei paskaičiuojamas tankis (žr. 41 pav.).



41 pav. Skirtingų bandinių tankis.

Pagal aukščiau pateiktą bandinių tankio grafiką matoma, kad įdedant smulkaus užpildo bandinių tankis padidėja, tikėtina jog taip yra dėl tuštumų užpildymo tarp dirbtinio užpildo granuliu. Kitą vertus manoma kad didelę įtaką bandinių tankiui turėjo granuliu dydis, kadangi užpildo pasiskirstymas skirtinguose bandiniuose pagal dalelės dydį nebuvo vienodas.

Prieš gniuždymo stiprio bandymą buvo atliktas prizmelių lenkimo bandymas, kurio metu buvo norima vizualiai įvertinti dirbtinio užpildo sukibties savybes su cemento tešla. Perlenkus bandinius buvo nagrinėjamas suirimo vietos skerspjūvis.



42 pav. Bandinio Nr. 1 (100C) skerspjūvis per suirimo vietą po lenkimo bandymo (kairėje prizmelė be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė su smulkiu užpildu).

Nagrinėjant 42 paveikslą galima matyti, kad dirbtinis užpildas prizmelės suirimo metu atsikabino nuo cementinės tešlos abiejose bandiniuose. Galima daryti prielaidą, jog dirbtinio užpildo ir cementinės tešlos sukibimas buvo nepakankamas, todėl užpildo mechaninės savybės buvo išnaudotos ne pilnai.



43 pav. Bandinio Nr. 2 (20C80S) skerspjūvis per suirimo vietą po lenkimo bandymo (kairėje prizmelė be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė su smulkiu užpildu).

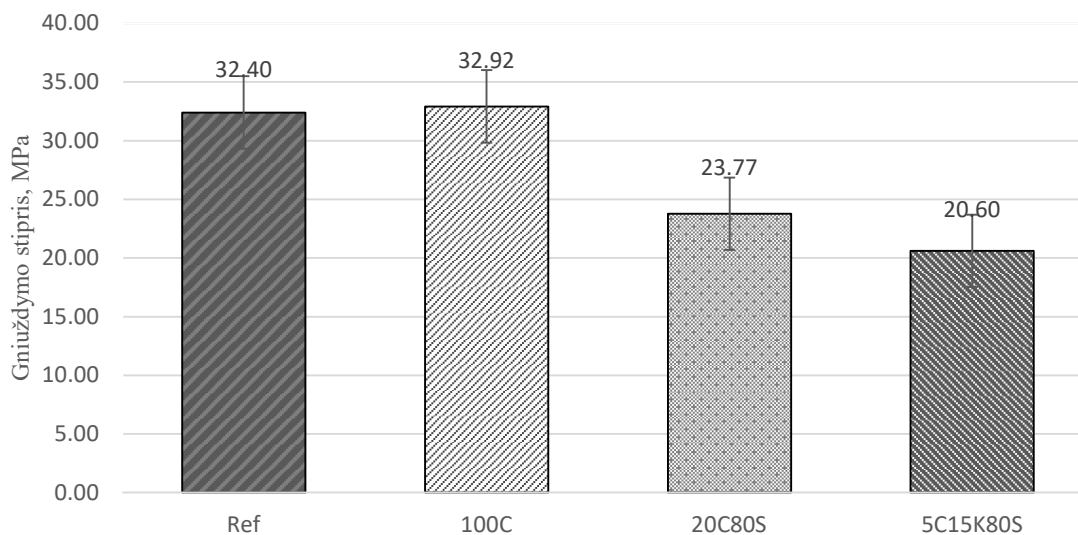
Prizmelėse, kuriuose buvo panaudotas dirbtinis užpildas su 80% malto stiklo ir 20% cemento pastebimas suirimas ne tik per cementinę tešlą, bet ir per patį užpildo skerspjūvį nepriklausomai ar bandinyje buvo naudojamas smulkus užpildas. Tačiau pastebima, kad dalis granulių prarado sukibimą su skiediniu. Toks suirimo pobūdis leidžia daryti prielaidą, jog užpildas dalinai pasiekė savo mechaninio stiprumo ribą, kadangi tik dalis užpildo suiro per savo skerspjūvį.



44 pav. Bandinio Nr. 3 (5C15K80S) skerspjūvis per suirimo vietą po lenkimo bandymo (kairėje prizmelė be smulkaus užpildo, dešinėje prizmelė su smulkiu užpildu).

Prizmelėse, kuriuose buvo panaudotas dirbtinis užpildas su 80% malto stiklo 15% gesintų kalkių ir 5% cemento pastebimas suirimas ne tik per cementinę tešlą, bet ir didžiąja dalimi per patį užpildo skerspjūvį nepriklausomai ar bandinyje buvo naudojamas smulkus užpildas. Matoma, kad tik labai maža dalis granulių prarado sukibimą su skiediniu. Pagal tokį suirimo pobūdį galima daryti prielaidą, jog užpildas pilnai pasiekė savo mechaninio stiprumo ribą, kadangi pastebimas skilimas per patį užpilą ir per skiedinį, o atkibusių granulių dalis sudaro labai mažą dalį.

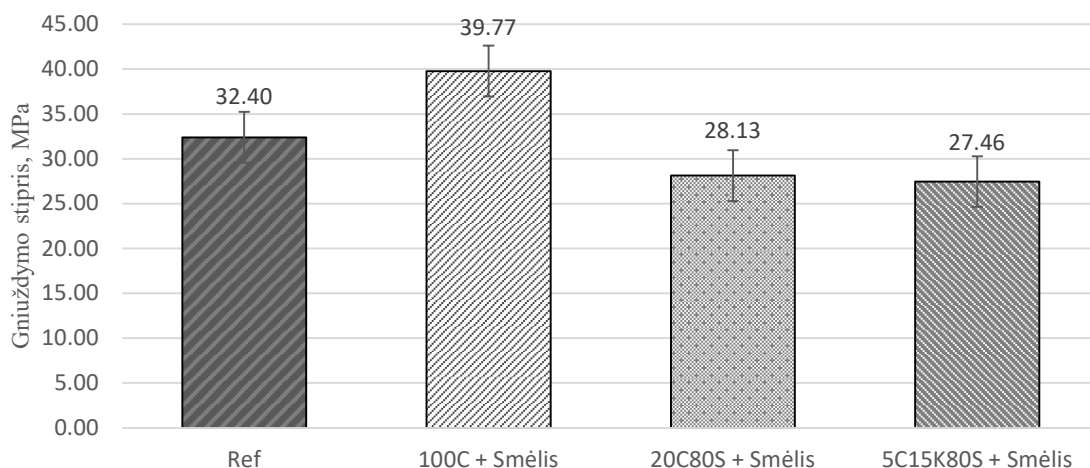
Pagal pateiktą grafiką (žr. 45pav.) matoma, kad naudojant dirbtinius užpildus be smulkaus užpildo matomas prizmelių gniuždomojo stiprio sumažėjimas su užpildu nr.2 (C20S80) ir su užpildu nr.3 (C5K15S80), kurie atitinkamai sumažėja 27,79 % ir 37,42 % lyginant su bandiniu nr.1 (100C). Lyginant pirmojo bandinio gniuždomąjį stiprį su pavyzdiniu bandiniu, kuomet buvo naudojamas cementas ir smėlis, matomas santykinai nedidelis pirmojo bandinio gniuždomojo stiprio padidėjimas, manoma kad šis stiprumo padidėjimas atsirado dėl užpildo ilgo kietėjimo laiko. Verta paminėti, kad šių bandinių gaminimui buvo išlaikytas vienodas vandens ir rišiklio santykis ($\frac{V}{C} = 0,45$).



45 pav. Betoninių bandinių, pagamintų iš skirtingo dirbtinio užpildo, gniuždomojo stipris.

Lyginant anksčiau gautus prizmelių stiprumo rezultatus su prizmelėmis, kuomet sudėtyje papildomai buvo naudotas smulkus užpildas (žr. 46pav.) matomas žymus gniuždomojo stiprio prieaugis, kuris varijuoja tarp 4-7 MPa atitinkamai pagal prizmelės sudėtį.

Pateiktame grafike (žr. 46pav.) matoma, kad naudojant dirbtinius užpildus kartu su smulkiu užpildu matomas prizmelių gniuždomojo stiprio sumažėjimas su antruoju bandiniu (C20S80) ir trečiuoju bandiniu (C5K15S80), kurie atitinkamai sumažėja 29,13 % ir 30,95 % lyginant su pirmuoju bandiniu (100C). Įdomu tai, jog pirmojo bandinio gniuždomas stipris palyginus su pavyzdiniu bandiniu yra ganėtinai didesnis ir matomas pirmojo bandinio gniuždomojo stiprio padidėjimas apie 7,37 MPa. Šių bandinių gaminimui buvo išlaikytas vienodas vandens ir rišiklio santykis ($\frac{V}{C} = 0,45$).



46 pav. Betoninių bandinių, pagamintų iš skirtingo dirbtinio užpildo ir smėlio, gniuždomo stipris.

4.11. Dirbtinių užpildų CO₂ pėdsako skaičiavimas

CO₂ emisijos skaičiavimas atliekamas pagal Luis F. Jimenez ir kt. [42] bei Feng Ma ir kt. [43] pateiktą metodiką.

$$CO_{2-e} = \sum(Q_1F_1 + Q_2F_2 + Q_nF_n) \quad (2.3.9.1)$$

čia:

CO_{2-e} – suminis išmetamo anglies dioksido kiekis, kg ;

Q_n – sunaudotas medžiagos kiekis, kg ;

F_n – emisijos faktorius (GWP-total) imamas iš poveikio aplinkai deklaracijų (EPD).

Šiuo atveju bus įvertinamos tik A₁-A₃ visuotinio atšilimo potencialo (GWP) vertės, EPD deklaracijos ieškotos <https://www.environdec.com/library> ir <https://www.epddanmark.dk/> internetiniuose žinyuose, kurių medžiagų savybės atitinka tiriamojoje dalyje naudotoms medžiagoms. Visų naudotų medžiagų visuotinio atšilimo potencialo reikšmės surašomos į 12 lentelę.

12 lentelė Medžiagų visuotinio atšilimo potencialo (GWP) reikšmės.

Medžiaga	Deklaruojamas vienetas, kuriam taikoma reikšmė	[A ₁ -A ₃] GWP(total) kg CO ₂ eq.	Deklaracijos nuoroda
Portlandcementis CEM I 42,5N	1000 kg	869	https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/a7ea1c58-75af-4e4f-e15f-08dbf085b35e/Data
Hidraulinės kalkės NHL 3,5	1 kg	0,211	https://www.epddanmark.dk/media/jffjrzaq/md-23075-en.pdf
Smėlis 0/2mm dalėlis dydžio	1000 kg	2,1	https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/06f4d82f-6da0-492b-c9a9-08da00e21b69/Data
Granitinė skalda 5/16mm dalelės dydžio	1000 kg	3,64	https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/2d40c68d-6686-49f8-05a0-08d9b9685fa2/Data

Remiantis skyrelio 2.3.1 nurodytais gamybai naudotais medžiagų kiekiais apskaičiuojamas dirbtinio užpildo išskiriamas CO₂ kiekis apimantis produkto gaminimo stadiją [A₁-A₃].

Vienam kubiniam metrui dirbtinio užpildo pagaminti išmetamas CO₂ kiekis:

Užpildas C100:

$$CO_{2-e(C100)} = QF = 1,35 \times 869 = 1173,15 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \quad (2.3.9.2)$$

Užpildas C20S80:

Kadangi šiam užpildui buvo naudojamas ir iš atliekos pagamintas maltas stiklas, todėl jo CO₂ pėdsakas bus neskaičiuojamas [42] tuomet:

$$CO_{2-e(C20S80)} = QF = 0,27 \times 869 = 234,63 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \quad (2.3.9.3)$$

Užpildas C5K15S80:

Kadangi šiam užpildui buvo naudojamas ir iš atliekos pagamintas maltas stiklas, todėl jo CO₂ pėdsakas bus neskaičiuojamas [42] tuomet:

$$CO_{2-e(C5K15S80)} = \sum(Q_C F_C + Q_K F_K) = 0,0675 \times 869 + 0,0825 \times 211 = 76,065 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \quad (2.3.9.4)$$

Paprastos granitinės skaldos ir užpildų išmetamo CO₂ kiekio palyginimui sumodeliuojamas betono mišinys, kurio 33% užima cementas, 33% smulkus užpildas ir 33% stambus užpildas arba dirbtinis užpildas, reikiamas medžiagos kiekis surašomas į **13 lentelę**, dirbtinių užpildų piltinis tankis imamas iš **9 lentelės**.

13 lentelė Medžiagų kiekiai norint pagaminti 1m³ betono mišinio

Medžiaga	Kiekis, kg
Portlandcementis CEM I 42,5N	445,5
Smėlis 0/2mm dalėlės dydžio	566,28
Stambaus užpildo kiekis norint pagaminti 1m³ betono mišinio	
Granitinė skalda 5/16mm dalelės dydžio	465,3
Užpildas C100	487,82
Užpildas C20S80	330,87
Užpildas C5K15S80	309,58

1m³ betono mišinio naudojant granitinę skalda išmetamas CO₂ kiekis apimantis produkto gaminimo stadiją [A₁-A₃]:

$$CO_{2-e(Granitas)} = \sum(Q_C F_C + Q_{Sm} F_{Sm} + Q_{Gr} F_{Gr}) = 0,446 \times 869 + 0,566 \times 2,1 + 0,465 \times 3,64 = 390,46 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \quad (2.3.9.5)$$

1m³ betono mišinio naudojant C100 dirbtinį užpildą išmetamas CO₂ kiekis apimantis produkto gaminimo stadiją [A₁-A₃]:

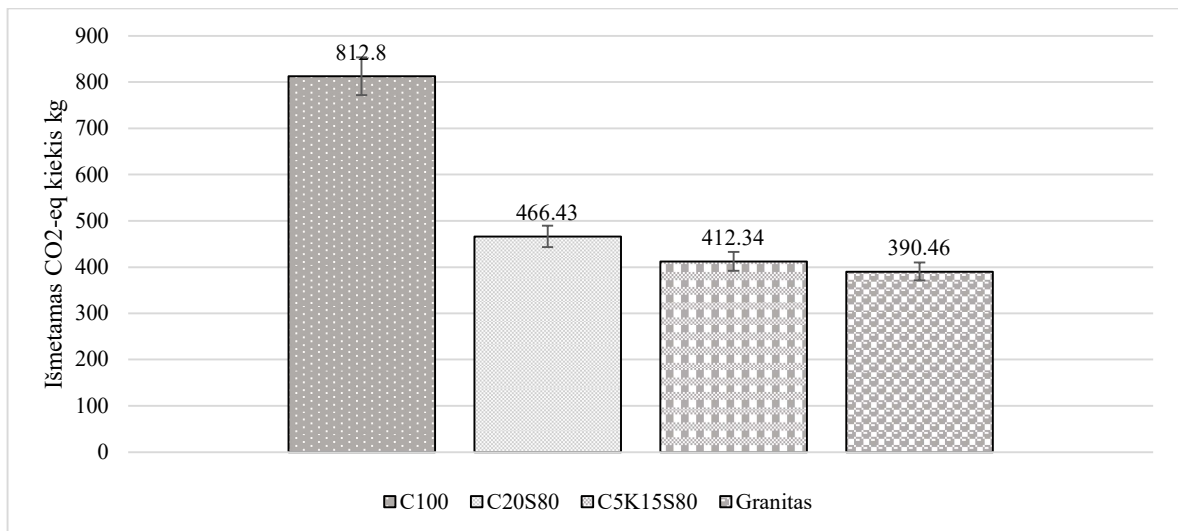
$$CO_{2-e(C100)} = \sum(Q_C F_C + Q_{Sm} F_{Sm} + Q_{C100} F_{C100}) = 0,446 \times 869 + 0,566 \times 2,1 + 0,488 \times 869 = 812,8 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \quad (2.3.9.6)$$

1m³ betono mišinio naudojant C20S80 dirbtinį užpildą išmetamas CO₂ kiekis apimantis produkto gaminimo stadiją [A₁-A₃]:

$$CO_{2-e(C20S80)} = \sum(Q_C F_C + Q_{Sm} F_{Sm} + Q_{C20S80} F_{C20S80}) = 0,446 \times 869 + 0,566 \times 2,1 + 0,331 \times 234,63 = 466,43 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \quad (2.3.9.7)$$

1m³ betono mišinio naudojant C20S80 dirbtinį užpildą išmetamas CO₂ kiekis apimantis produkto gaminimo stadiją [A₁-A₃]:

$$CO_{2-e(C5K15S80)} = \sum(Q_C F_C + Q_{Sm} F_{Sm} + Q_{C5K15S80} F_{C5K15S80}) = 0,446 \times 869 + 0,566 \times 2,1 + 0,310 \times 76,07 = 412,34 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \quad (2.3.9.8)$$



47 pav. 1m³ betono mišinio naudojant skirtingus stambius užpildus CO₂ kiekis.

Iš diagramos matome (žr. 47 pav.) kad norint pagaminti 1m³ betono mišinio ir naudojant dirbtinį užpildą anglies dioksido dujų išmetimas į aplinką yra didesnis nei naudojant iškastinį granito užpildą vertinant tik produkto gaminimo stadiją [A1-A3], tačiau naudojant užpildą C5K15S80 išmetamas CO₂ kiekis skiriasi vos 22kg. Pagrindinė dirbtinio užpildo problema yra sunaudojamas cemento kiekis, kadangi jis turi didžiausią įtaką anglies dioksido dujų emisijai.

Išvados

1. Išanalizavus stiklo savybes ir panaudojimo galimybes buvo sukurta malto stiklo tinkamo dirbtinio užpildo gamybai paruošimo technologija panaudojant rutulinį malūną.

2. Ištirta malto stiklo įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesams naudojant pusiau adiabatinio kalorimetrijos bandymą, kurio metu pastebėta, kad maltas stiklas neturėjo didelės įtakos cemento hidratacijos procesui kadangi tarp pavyzdinio bandinio, kurio sudėtis buvo 100% cemento ir tarp sudėties su 20% cemento ir 80% malto stiklo matomas tik 27 minučių tarpas hidratacijos pabaigos, tuo tarpu naudojant hidraulinės kalkės ir cementą kartu pastebėta, jog hidraulinės kalkės greitina rišiklių hidratacijos procesą, didžiausias tarpas tarp skirtingų mišinių buvo 129 minutės, todėl šį procesą padaro mažiau nuspėjama.

3. Išanalizuotos pagamintų dirbtinių užpildų fizikinės ir mechaninės savybės, pagal granulometrijos nustatymo rezultatus visi užpildai atitinka stambaus užpildo sąvoką vadovaujantis LST EN 12620:2003+A1:2008 standartu, kadangi dalelių dydžiai svyravo tarp 4/16 mm dydžio.

3.1. Atlikus dirbtinių užpildų vizualinę analizę buvo pastebėta daug tuščių ertmių užpildo viduje, dėl šios priežasties galėjo sumažėti užpildų mechaninis stiprumas. Didžiausias ertmių kiekis buvo pastebėtas C5K15S80 užpilduose. Nagrinėjant užpildo įgeriamumą pastebėta, jog C5K15S80 užpildas įgeria daugiausiai vandens (20,66 %) palyginus su C20S80 (15,36 %) ir C100 (9,28 %) užpildais.

3.2. Atlikus atsparumo šalčiui bandymą po 28 ciklų matoma kad užpildo kurio sudėtis yra C100 nubyrėjimas siekia vos 0,25%, tuo tarpu C20S80 ir C5K15S80 užpildų nubyrėjimas yra ganėtinai didesnis, atitinkamai 6,39 % ir 14,83 %. Tikėtina, kad toks didelis nubyrėjimas yra dėl mažo cemento kiekio panaudojimo. Tačiau atlikus tą patį bandymą tačiau užpildus sumaišant su cementu ir smėliu taip suformuojant prizmelę po 28 ciklų nepastebėta jokių šaldymo ir šildymo ciklui būdingų pažeidimų.

3.3. Atlikus susitraukimo deformacijų bandymą nustatyta, jog po 34 dienų C100 ir pavyzdinio bandinių deformacijos siekė atitinkamai -0.706 ir -0.712, C20S80 bandinio susitraukimo deformacijų kreivėje pastebimas tolygus deformacijų didėjimas kur 34 dieną deformacijos siekė -0,763 mm/m, tuo tarpu C5K15C80 bandinyje matomos didžiausios susitraukimo deformacijos -0,831 mm/m.

3.4. Prizmelių gniuždymo bandyme nustatyta, kad naudojant įvairių dirbtinių užpildų gniuždymo stipris mažėja, tačiau panaudojus smulkaus užpildo (šiuo atveju smėlio) buvo gauti žymiai geresni rezultatai. Mažiausias gniuždymo stipris buvo pastebėtas bandinyje, kurio sudėtyje yra C5K15S80 užpildo ir gniuždymo stipris siekė 20,6 MPa, o didžiausias gniuždymo stipris pastebėtas bandinyje, kurio sudėtyje buvo 100C užpildo ir smulkaus užpildo, šio bandinio gniuždymo stipris siekė 39,77 MPa.

4. Apskaičiavus užpildų CO₂ dujų pėdsaką, ir palyginus jį su granito skalda pastebėta kad norint pagaminti 1m³ betono mišinio ir naudojant dirbtinį užpildą anglies dioksido dujų išmetimas į aplinką yra didesnis nei naudojant iškastinį granito užpildą įvertinant tik produkto gaminimo stadiją [A1-A3], tačiau naudojant užpildą C5K15S80 išmetamas CO₂ kiekis skiriasi vos 22kg.

Literatūros sąrašas

1. IBRAHIM, S. and MEAWAD, A. Assessment of Waste Packaging Glass Bottles as Supplementary Cementitious Materials. *Construction & Building Materials*, Sep 10, 2018, vol. 182. pp. 451-458. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.119> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.119.
2. DABIC, P. and BARBIR, D. Implementation of Natural and Artificial Materials in Portland Cement. *Hemjska Industrija*, 2020, vol. 74, no. 3. pp. 147-161. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2432425582> CrossRef. ISSN 0367-598X. DOI 10.2298/HEMIND191216014D.
3. FAHIM HUSEIEN, G., et al. Structure, Morphology and Compressive Strength of Alkali-Activated Mortars Containing Waste Bottle Glass Nanoparticles. *Construction & Building Materials*, Aug 01, 2022, vol. 342. pp. 128005. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128005> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.128005.
4. HAO, D.L.C., et al. *Artificial Lightweight Aggregates made from Pozzolanic Material: A Review on the Method, Physical and Mechanical Properties, Thermal and Microstructure*. MDPI AG, -05-31, 2022 DOI 10.3390/ma15113929.
5. PARK, W., KIM, T., ROH, S. and KIM, R. Analysis of Life Cycle Environmental Impact of Recycled Aggregate. *Applied Sciences*, Mar 01, 2019, vol. 9, no. 5. pp. 1021. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2250571009> CrossRef. ISSN 2076-3417. DOI 10.3390/app9051021.
6. MIRALDO, S., LOPES, S., PACHECO-TORGAL, F. and LOPES, A. Advantages and Shortcomings of the Utilization of Recycled Wastes as Aggregates in Structural Concretes. *Construction & Building Materials*, Sep 06, 2021, vol. 298. pp. 123729. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123729> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.123729.
7. AL-MANSOUR, A., et al. Green Concrete: By-Products Utilization and Advanced Approaches. *Sustainability*, Oct 01, 2019, vol. 11, no. 19. pp. 5145. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2398142025> CrossRef. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su11195145.
8. ABHYANKAR, S. and CHOURAGADE, M. Environmental Aspects of Concrete and use of Waste Glass. *Helix*, Feb 29, 2020, vol. 10, no. 1. pp. 137-139 CrossRef. ISSN 2277-3495. DOI 10.29042/2020-10-1-137-139.
9. KONG, L. and MA, B. Evaluation of Environmental Impact of Construction Waste Disposal Based on Fuzzy Set Analysis. *Environmental Technology & Innovation*, Aug, 2020, vol. 19. pp. 100877. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2020.100877> CrossRef. ISSN 2352-1864. DOI 10.1016/j.eti.2020.100877.
10. ABARCA-GUERRERO, L. and LEANDRO-HERNANDEZ, A. Material Management Practices for Construction Waste Reduction. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Jan 01, 2017, vol. 223. pp. 551. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2255741169> Publicly Available Content Database. ISSN 1746-448X. DOI 10.2495/SC170481.
11. MEDINECKIENE, M., TURSKIS, Z. and ZAVADSKAS, E.K. Sustainable Construction Taking into Account the Building Impact on the Environment. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, Jun 01, 2010, vol. 18, no. 2. pp. 118-127. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/jeelem.2010.14> CrossRef. ISSN 1648-6897. DOI 10.3846/jeelem.2010.14.
12. JAMELLODIN, Z., et al. Evaluation of Fresh and Hardened Concrete Properties Incorporating Glass Waste as Partial Replacement of Fine Aggregate. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, Dec 01, 2022, vol. 14, no. 23. pp. 15895. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2748568368> CrossRef. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su142315895.
13. ZHANG, Q.Y., ZHANG, W.J., WANG, W.C. and JIANG, Z.H. Calculation of Physical Properties of Glass Via the Phase Diagram Approach. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Feb 01, 2017, vol. 457. pp. 36-43. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.11.005> CrossRef. ISSN 0022-3093. DOI 10.1016/j.jnoncrysol.2016.11.005.
14. BORGES, A.L., et al. Evaluation of the Pozzolanic Activity of Glass Powder in Three Maximum Grain Sizes. *Materials Research (São Carlos, São Paulo, Brazil)*, Jan 01, 2021, vol. 24, no. 4. pp. 1. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2555420070> CrossRef. ISSN 1516-1439. DOI 10.1590/1980-5373-mr-2020-0496.

15. KASANIYA, M., THOMAS, M.D.A. and MOFFATT, E.G. Pozzolanic Reactivity of Natural Pozzolans, Ground Glasses and Coal Bottom Ashes and Implication of their Incorporation on the Chloride Permeability of Concrete. *Cement and Concrete Research*, Jan, 2021, vol. 139. pp. 106259. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106259> CrossRef. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2020.106259.
16. QIN, D., HU, Y. and LI, X. Waste Glass Utilization in Cement-Based Materials for Sustainable Construction: A Review. *Crystals (Basel)*, Jun 01, 2021, vol. 11, no. 6. pp. 710. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2544711920> CrossRef. ISSN 2073-4352. DOI 10.3390/cryst11060710.
17. AFSHINNIA, K. and RANGARAJU, P.R. Influence of Fineness of Ground Recycled Glass on Mitigation of Alkali-silica Reaction in Mortars. *Construction & Building Materials*, Apr 15, 2015, vol. 81. pp. 257-267. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041.
18. SHI, C., WU, Y., RIEFLER, C. and WANG, H. Characteristics and Pozzolanic Reactivity of Glass Powders. *Cement and Concrete Research*, May 01, 2005, vol. 35, no. 5. pp. 987-993. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015> CrossRef. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2004.05.015.
19. OMRAN, A. and TAGNIT-HAMOU, A. Performance of Glass-Powder Concrete in Field Applications. *Construction & Building Materials*, Apr 15, 2016, vol. 109. pp. 84-95. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006.
20. SERPA, D., et al. ASR of Mortars Containing Glass. *Construction & Building Materials*, Oct 01, 2013, vol. 47. pp. 489-495. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.058> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.058.
21. LI, Z., THOMAS, R.J. and PEETHAMPARAN, S. Alkali-Silica Reactivity of Alkali-Activated Concrete Subjected to ASTM C 1293 and 1567 Alkali-Silica Reactivity Tests. *Cement and Concrete Research*, Sep 01, 2019, vol. 123. pp. 105796. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105796> CrossRef. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2019.105796.
22. LAHDENSIVU, J., KEKÄLÄINEN, P. and LAHDENSIVU, A. Alkali-Silica Reaction in Finnish Concrete Structures. *Nordic Concrete Research*, Dec 01, 2018, vol. 59, no. 1. pp. 31-44. Available from: <http://www.degruyter.com/doi/10.2478/ncr-2018-0013> CrossRef. ISSN 2545-2819. DOI 10.2478/ncr-2018-0013.
23. DHIR, R.K., DYER, T.D. and TANG, M.C. Alkali-Silica Reaction in Concrete Containing Glass. *Materials and Structures*, Dec 01, 2009, vol. 42, no. 10. pp. 1451-1462. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-008-9465-8> CrossRef. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-008-9465-8.
24. AFSHINNIA, K. and RANGARAJU, P.R. Influence of Fineness of Ground Recycled Glass on Mitigation of Alkali-silica Reaction in Mortars. *Construction & Building Materials*, Apr 15, 2015, vol. 81. pp. 257-267. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041.
25. MOHAJERANI, A., et al. Practical Recycling Applications of Crushed Waste Glass in Construction Materials: A Review. *Construction & Building Materials*, Dec 15, 2017, vol. 156. pp. 443-467. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005.
26. QAIDI, S., et al. Concrete Containing Waste Glass as an Environmentally Friendly Aggregate: A Review on Fresh and Mechanical Characteristics. *Materials*, Sep 07, 2022, vol. 15, no. 18. pp. 6222. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2716581639> CrossRef. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma15186222.
27. RASHAD, A.M. A Brief on High-Volume Class F Fly Ash as Cement Replacement – A Guide for Civil Engineer. *International Journal of Sustainable Built Environment*, Dec 01, 2015, vol. 4, no. 2. pp. 278-306. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijse.2015.10.002> CrossRef. ISSN 2212-6090. DOI 10.1016/j.ijse.2015.10.002.
28. REN, P., LING, T. and MO, K.H. Recent Advances in Artificial Aggregate Production. *Journal of Cleaner Production*, Apr 01, 2021, vol. 291. pp. 125215. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125215> CrossRef. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.125215.
29. KALINOWSKA-WICHROWSKA, K., PAWLUCZUK, E., BOŁTRYK, M. and NIETUPSKI, A. Geopolymer Concrete with Lightweight Artificial Aggregates. *Materials*, Apr 21, 2022, vol. 15, no. 9. pp.

3012. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35591347> PubMed. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma15093012.
30. Ravindra K. Dhir, Jorge de Brito, Ciarán J. Lynn and Rui V. Silva. Sustainable Construction Materials Elsevier Ltd, 2018 5 - *Concrete-Related Applications*, pp. 139-195. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100997-0.00005-1> ISBN 9780081009963. DOI 10.1016/B978-0-08-100997-0.00005-1.
31. XU, L., HUANG, B. and DAI, J. Development of Engineered Cementitious Composites (ECC) using Artificial Fine Aggregates. *Construction & Building Materials*, Oct 25, 2021, vol. 305. pp. 124742. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124742> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.124742.
32. KURSULA, K., PERUMAL, P., OHENOJA, K. and ILLIKAINEN, M. Production of Artificial Aggregates by Granulation and Carbonation of Recycled Concrete Fines. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Nov 01, 2022, vol. 24, no. 6. pp. 2141-2150. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-022-01457-y> CrossRef. ISSN 1438-4957. DOI 10.1007/s10163-022-01457-y.
33. TAJRA, F., ELRAHMAN, M.A., CHUNG, S. and STEPHAN, D. Performance Assessment of Core-Shell Structured Lightweight Aggregate Produced by Cold Bonding Pelletization Process. *Construction & Building Materials*, Aug 10, 2018, vol. 179. pp. 220-231. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.237> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.237.
34. COLANGELO, F., MESSINA, F. and CIOFFI, R. Recycling of MSWI Fly Ash by Means of Cementitious Double Step Cold Bonding Pelletization: Technological Assessment for the Production of Lightweight Artificial Aggregates. *Journal of Hazardous Materials*, Dec 15, 2015, vol. 299. pp. 181-191. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.018> PubMed. ISSN 0304-3894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2015.06.018.
35. LO, T.Y., CUI, H., MEMON, S.A. and NOGUCHI, T. Manufacturing of Sintered Lightweight Aggregate using High-Carbon Fly Ash and its Effect on the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete. *Journal of Cleaner Production*, Jan 20, 2016, vol. 112. pp. 753-762. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.001> CrossRef. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.07.001.
36. NADESAN, M.S. and DINAKAR, P. Influence of Type of Binder on High-Performance Sintered Fly Ash Lightweight Aggregate Concrete. *Construction & Building Materials*, Jul 10, 2018, vol. 176. pp. 665-675. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.057> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.057.
37. JIANG, Y., LING, T. and SHI, M. Strength Enhancement of Artificial Aggregate Prepared with Waste Concrete Powder and its Impact on Concrete Properties. *Journal of Cleaner Production*, Jun 01, 2020, vol. 257. pp. 120515. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120515> CrossRef. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120515.
38. LU, Z., TAN, Q., LIN, J. and WANG, D. Properties Investigation of Recycled Aggregates and Concrete Modified by Accelerated Carbonation through Increased Temperature. *Construction & Building Materials*, Jul 25, 2022, vol. 341. pp. 127813. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127813> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.127813.
39. WANG, D., et al. Characteristics of Autoclaved Lightweight Aggregates with Quartz Tailings and its Effect on the Mechanical Properties of Concrete. *Construction & Building Materials*, Nov 30, 2020, vol. 262. pp. 120110. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120110> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.120110.
40. KAPETANAKI, K., KAPRIDAKI, C. and MARAVELAKI, P. Nano-TiO₂ in Hydraulic Lime–Metakaolin Mortars for Restoration Projects: Physicochemical and Mechanical Assessment. *Buildings*, Nov 01, 2019, vol. 9, no. 11. pp. 236. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2547474711> CrossRef. ISSN 2075-5309. DOI 10.3390/buildings9110236.
41. MARAGHECHI, H., MARAGHECHI, M., RAJABIPOUR, F. and PANTANO, C.G. Pozzolanic Reactivity of Recycled Glass Powder at Elevated Temperatures: Reaction Stoichiometry, Reaction Products and Effect of Alkali Activation. *Cement & Concrete Composites*, Oct 01, 2014, vol. 53. pp. 105-114. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.015> CrossRef. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2014.06.015.

42. JIMÉNEZ, L.F., DOMÍNGUEZ, J.A. and VEGA-AZAMAR, R.E. Carbon Footprint of Recycled Aggregate Concrete. *Advances in Civil Engineering*, Jan 01, 2018, vol. 2018. pp. 1-6. Available from: <https://dx.doi.org/10.1155/2018/7949741> CrossRef. ISSN 1687-8086. DOI 10.1155/2018/7949741.
43. MA, F., SHA, A., YANG, P. and HUANG, Y. The Greenhouse Gas Emission from Portland Cement Concrete Pavement Construction in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Jul 01, 2016, vol. 13, no. 7. pp. 632-1. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27347987> MEDLINE. ISSN 1660-4601. DOI 10.3390/ijerph13070632.
44. <https://www.lrt.lt/naujienos/verslas/4/2038719/vyriausybe-visuomeniniu-pastatu-statybose-nuo-2024-uju-50-proc-organiniu-medziagu>

Priedai

1 priedas. Dalyvavimo „SMART BUILT ENVIRONMENT“ konferencijoje sertifikatas

STUDENT SCIENTIFIC CONFERENCE



CERTIFICATE

Aivaras Rimgaila

Has participated in Student scientific conference
„SMART BUILT ENVIRONMENT“
on 24 November 2023

Delivered the presentation:
Reduction of CO2 Emission through Utilisation of Municipal
Glass Waste in the form Artificial Aggregates and Study of the
Properties of the Aggregate

Dean of the Faculty of Civil
Engineering and Architecture

Prof. Dr. Andrius Jurelionis

