



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Plonasluoksnių gaminių gamyba „žaliosios“ technologijos būdu kietinant CO₂ aplinkoje

Baigiamasis magistro projektas

Monika Druskevičiūtė

Projekto autorė

Doc. Algirdas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Plonasluoksnių gaminių gamyba „žaliosios“ technologijos būdu kietinant CO₂ aplinkoje

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Monika Druskevičiūtė

Projekto autorė

Doc. Algirdas Augonis

Vadovas

Doc. Audrius Grinys

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Monika Druskevičiūtė

Plonasluoksnių gaminių gamyba „žaliosios“ technologijos būdu kietinant CO₂ aplinkoje

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Monika Druskevičiūtė

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):

GAMINIŲ GAMYBA "ŽALIOSIOS" TECHNOLOGIJOS BŪDU JUOS KIETINANT CO₂
APLINKOJE

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: 2023 m. lapkričio 30 d. Nr. V25-09-28

(lietuvių k.): PLONASLUOKSNIŲ GAMINIŲ GAMYBA „ŽALIOSIOS“ TECHNOLOGIJOS
BŪDU KIETINANT CO₂ APLINKOJE

(anglų k.): MANUFACTURING OF THIN-LAYER PRODUCTS USING „GREEN“
TECHNOLOGY BY CURING IN A CO₂ ENVIRONMENT

Pradiniai duomenys darbui:

-

Baigiamojo projekto dalys:

Atlikti

Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	x
Analitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Skaitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį):

-

Vadovas:

doc. dr. Algirdas Augonis

(indėlis 100 %)

*pareigos, vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu*

Studentė:

Monika Druskevičiūtė

*vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu*

Druskevičiūtė, Monika. Plonasluoksnių gaminių gamyba „žaliosios“ technologijos būdu juos kietinant CO₂ aplinkoje. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Algirdas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: anglies dioksidas, karbonizacija, betonas, kalkės.

Kaunas, 2024. 67 p.

Santrauka

Magistro baigiamojo darbo tikslas – žaliosios technologijos būdu pagaminti CO₂ dujomis kietintą plonasluoksnių mineralinio kompozito bandinius ir ištirti jų fizikines ir mechanines savybes. Darbo tikslui įgyvendinti buvo išsikelti 6 darbo uždaviniai aprašyti įvadinėje dalyje.

Baigiamąjį darbą sudaro trys pagrindinės dalys: literatūros analizė, tyrimų metodika bei eksperimentų rezultatai bei jų analizė.

Literatūros analizės dalyje aprašyta betono gamyba ir pagrindiniai gaminių formavimo metodai. Surinkta informacija apie karbonizacijos technologiją, jai naudojamus metodus ir cheminius procesus vykstančius betono gaminiuose juos karbonizuojant. Taip pat apžvelgus panašius tyrimus aprašyta karbonizacijos įtaka pagrindinėms betono savybėms, CO₂ kietinimo sąlygų įtaka karbonizacijos efektyvumui ir savybėms bei galimas panaudojimas statyboje.

Tyrimų metodikos dalyje aprašytos 3 bandinių grupės (1-oji – cilindriniai gaminiai; 2-oji – gamyklinės trinkelės; 3-ioji – plonasluoksniai gaminiai). Tyrimų metodikos aprašas pradėtas nuo bandomajame darbe minimų standartų sąrašo, naudotų medžiagų aprašo. Kiekviena bandinių grupė aprašyta atskirai pateikiant bandinių sudėties, gamybos, kietinimo sąlygų ir eksperimentinių tyrimų aprašus bei skaičiavimams naudotas formules.

Eksperimentinių rezultatų dalyje pateikti ir analizuoti bandymų metu gauti rezultatai. Šioje dalyje buvo analizuojama kokią įtaką kietinimas CO₂ dujomis turėjo bandinių fizikinėms ir mechaninėms savybėms, juos lyginant su ore kietintais bandiniais. Taip pat buvo analizuojama kaip kinta bandinių savybės pakeičiant rišiklio tipą ar kiekį mišinyje.

Magistro baigiamasis darbas apibendrintas 8-iomis rezultatų išvadomis.

Baigiamojo darbo apimtis – 67 psl., darbe pateikti 56 paveiksai, 18 lentelės, 58 literatūros šaltiniai ir 1 priedas.

Druskevičiūtė, Monika. Manufacturing of Thin-Layer Products Using „Green“ Technology by Curing in CO₂ Environment. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Algirdas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: carbon dioxide, carbonation, concrete, lime.

Kaunas, 2024. 67 pages.

Summary

The aim of the master's thesis is to produce samples of thin-layer mineral composite hardened by CO₂ gas using green technology and to determine its physical and mechanical properties. In order to achieve the research goal, 6 tasks were defined and described in the introductory part.

The final work is divided into three main parts: literature analysis, research methodology, and the presentation and analysis of experimental results.

The literature analysis describes the production of concrete and the main methods of product formation. Information was collected regarding carbonation technology, the methods employed, and the chemical processes occurring in concrete products during their carbonation. Moreover, after reviewing analogous studies, the influence of carbonation on the main properties of concrete, the influence of CO₂ curing conditions on the efficiency and properties of carbonation, as well as potential applications in construction, were described.

The research methodology part outlines 3 groups of samples: the first comprises cylindrical products, the second consists of factory pads, and the third involves thin-layered products. The description of the research methodology commences with the listing of standards used in the project and the description of the materials used. Each sample group is described individually by providing descriptions of sample composition, production, curing conditions and experimental tests, as well as formulas for calculations.

The experimental results part presents and analyzes the findings obtained during the tests. In this part, an examination was conducted of the impact of curing with CO₂ gas had on physical and mechanical properties of the samples, with a comparative analysis against air-cured samples. It was also analyzed how the properties of the samples vary by changing the type or amount of binder in the mixture.

The master's final thesis is summarized by 8 conclusions derived from the results.

The final document span – 67 pages, the work contains 56 figures, 18 tables, 58 literature sources and 1 appendix.

Turinys

Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Literatūros analizė.....	12
1.1. Betonas	12
1.2. Gaminių gamyba	12
1.2.1. Liejimas	13
1.2.2. Vibroformavimas.....	13
1.2.3. Presavimas.....	13
1.3. Karbonizacijos technologija	14
1.3.1. Bandinių paruošimas karbonizacijai.....	14
1.3.2. Standartinis metodas.....	15
1.3.3. Slėginis metodas.....	15
1.3.4. Tėkmės metodas	16
1.3.5. Vandens ir CO ₂ dujų metodas	17
1.3.6. Po bandinių kietinimo.....	17
1.4. Cheminiai karbonizacijos procesai skirtingose medžiagose	17
1.4.1. Portland cementas (hidraulinė medžiaga)	18
1.4.2. Nehidrauliniai kalcio silikatai.....	19
1.4.3. Pramoninės atliekos.....	19
1.5. Rišikliai.....	20
1.6. Karbonizacijos įtaka pagrindinėms betono savybėms.....	20
1.6.1. Gniuždomasis stipris	20
1.6.2. Atsparumas šalčiui.....	21
1.6.3. Vandens įgėris	22
1.6.4. pH lygis	23
1.7. Sąlygų įtaka karbonizacijos efektyvumui ir savybėms	23
1.7.1. Santykinė oro drėgmė.....	23
1.7.2. Dujų srauto greitis	24
1.7.3. Dujų koncentracija.....	24
1.7.4. Temperatūra.....	25
1.7.5. Tankis	25
1.7.6. Betono sudėtis ir V/C santykis	25
1.7.7. Dalelių dydis.....	27
1.8. Panaudojimas.....	27
2. Tyrimų metodologija.....	28
2.1. Standartų sąrašas	28
2.2. Naudotos medžiagos.....	29
2.2.1. Kvarcinis smėlis	29
2.2.2. Cementas	29
2.2.3. Kalkės	29
2.2.4. Papildomi priedai.....	29
2.3. Hidraulinis presas ir giratoriumi formuotų gaminių tyrimai	30
2.3.1. Bandinių sudėtis	30
2.3.2. Bandinių formavimas	31
2.3.3. Kietinimo sąlygos.....	32

2.3.4. Eksperimentiniai tyrimai	33
2.4. Gamykloje formuotų grindinio trinkelių eksperimentiniai tyrimai	35
2.4.1. Bandinių sudėtis ir gamyba	35
2.4.2. Kietinimo sąlygos	35
2.4.3. Eksperimentiniai tyrimai	35
2.5. Presuotų plonasluoksnių bandinių eksperimentiniai tyrimai.....	39
2.5.1. Bandinių sudėtis	39
2.5.2. Bandinių formavimas	40
2.5.3. Kietinimo sąlygos.....	41
2.5.4. Eksperimentiniai tyrimai	41
3. Tyrimų rezultatai.....	43
3.1. 1 bandymų grupė - hidrauliniu presu ir giratoriumi formuotų gaminių tyrimų rezultatai.....	43
3.1.1. Tankio nustatymas.....	43
3.1.2. Vandens įgėrio nustatymas.....	44
3.1.3. Gniuždomojo stiprio nustatymas	44
3.1.4. Karbonizacijos gylio nustatymas.....	46
3.2. 2 bandymų grupė - gamykloje formuotų grindinio trinkelių tyrimų rezultatai	47
3.2.1. Vandens įgėrio nustatymas.....	47
3.2.2. Skeliamojo stiprio nustatymas.....	48
3.2.3. Karbonizacijos gylio nustatymas.....	48
3.2.4. Dilumo nustatymas	49
3.2.5. Atsparumo šalčiui nustatymas	50
3.2.6. Cheminės sudėties tyrimas	51
3.2.7. pH lygio nustatymas	51
3.3. 3 bandymų grupė - presuotų plonasluoksnių bandinių eksperimentų rezultatai	52
3.3.1. Tankio nustatymas.....	52
3.3.2. Vandens įgėrio nustatymas.....	53
3.3.3. Lenkiamojo stiprio nustatymas.....	54
3.3.4. Karbonizacijos gylio nustatymas.....	56
4. Bandinių įsisavinto CO₂ dujų kiekis	58
Išvados	60
Literatūros šaltiniai	61
Priedai.....	67
1 priedas. Dalyvavimas mokslinėje konferencijoje „Smart Built Environment“	67

Paveikslų sąrašas

1 pav. Šlapio betono presavimas [9]	13
2 pav. Karbonizacijos laipsnio priklausomybė nuo išankstinio kietėjimo laiko [16]	15
3 pav. Standartinio karbonizacijos metodo schema [16].....	15
4 pav. Slėginio karbonizacijos metodo schema [16].....	16
5 pav. Tėkmės karbonizacijos metodo schema [16].....	16
6 pav. Vandens ir CO ₂ karbonizacijos metodo schema [20]	17
7 pav. Cementinių medžiagų karbonizacijos schema [21]	18
8 pav. Gniuždomasis stipris blokuose: A - kitimas bėgant laikui, B - priklausomybė nuo bloko dalies [30]	21
9 pav. Betono bandinių masės praradimas veikiant šildymo-šaldymo ciklams [31]	22
10 pav. V/C ir CO ₂ dujų kietinimo laiko įtaka vandens įgėriui, kietinant skirtingose temperatūrose: (a) - 1 parą karbonizuoti bandiniai, (b) - 7 paras karbonizuoti bandiniai, (c) - 28 paras karbonizuoti bandiniai, (d) – 28 paras vandenyje kietinti bandiniai [32].....	22
11 pav. Betono bandinių pH lygiai [33]	23
12 pav. Skirtingų betono sudėčių ryšys tarp RH ir karbonizacijos gylio [34]	23
13 pav. Santykinės drėgmės įtaka karbonizacijai [26].....	24
14 pav. Dujų srauto greičio įtaka karbonizacijai [26]	24
15 pav. CO ₂ dujų koncentracijos įtaka karbonizacijai [26].....	25
16 pav. Karbonizacijos efektyvumo priklausomybė nuo tankio [36]	25
17 pav. Skirtingos sudėties betono gaminių karbonizacijos laipsnis [38].....	26
18 pav. Karbonizacijos laipsnio priklausomybė nuo V/C santykio [38].....	27
19 pav. Kvarcinis smėlis 0,0-0,4 mm frakcijos [53, 54]	29
20 pav. Portlandcementis CEM I 42,5 N [55, 56].....	29
21 pav. Gesintos kalkės [57, 58]	29
22 pav. Kiaušinių baltymų milteliai	30
23 pav. Maisto papildas - chitosan	30
24 pav. Vyno rūgštis	30
25 pav. Mišinių maišyklė „Automix 65-L0006A“, tūris - 3l	31
26 pav. Sumaišytas mišinys	31
27 pav. Delne suspaustas mišinys (standus).....	31
28 pav. Suspausto standaus suirimas į jį dūrus pirštu	31
29 pav. Bandymo mašina – hidraulinis presas	31
30 pav. Giratorius "Controls"	32
31 pav. Specialus giratoriaus presavimo indas.....	32
32 pav. CO ₂ dujų kameros klimatinės sąlygos	32
33 pav. Džiovinimo krosnis/kamera.....	34
34 pav. Fenolftaleino tirpalas - pH indikatorius.....	34
35 pav. Vakuumo prietaisas.....	35
36 pav. Skėlimo bandymas naudojantis presu	37
37 pav. Böhme metodu naudojamos įrangos principinė schema: 1 - atsvara; 2 - bandinys; 3 - bandinio laikiklis; 4 – besisukantis diskas; 5 - bandymo takas; 6 - apkrovimo svarstis [52].....	38
38 pav. pH lygio nustatymas	39
39 pav. 3 bandinių grupės gamybos procesas	40
40 pav. Šviežiai iš presavimo formos išimti bandiniai.....	40
41 pav. Bandinio apkrovimo schema (centrinio taško apkrovimas): 1 - apkrovimo ritinys; 2,3 – atrėmimo ritinys [46].....	42
42 pav. Cementinių ir kalkinių bandinių tankis	43

43 pav.	Cementinių bandinių aukščio skirtumas: 1 – gamintas presu; 2 – gamintas giratoriumi	44
44 pav.	Cementinių bandinių gniuždymo bandymo grafikas	45
45 pav.	Cementinių ir kalkinių bandinių gniuždomasis stipris	45
46 pav.	Trinkelio vandens įgėrio priklausomybė nuo kietinimo sąlygų	47
47 pav.	Trinkelio poringumo priklausomybė nuo kietinimo sąlygų	47
48 pav.	Tempimo stiprio skėlimui priklausomybė nuo kietinimo sąlygų	48
49 pav.	Dilumo bandymo galutiniai rezultatai	50
50 pav.	Cementinių ir kalkinių bandinių tankis	52
51 pav.	Trečios grupės bandinių vandens įgėrio priklausomybė nuo kietinimo sąlygų.....	53
52 pav.	Trečios grupės bandinių vandens įgėrio priklausomybė nuo kietinimo sąlygų.....	54
53 pav.	Lenkimo bandymui paruoštas bandinys	54
54 pav.	Suiręs bandinys pasiekęs didžiausią ardomąją apkrovą	54
55 pav.	Plonasluoksnių gaminių lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo sudėties ir kietinimo sąlygų	55
56 pav.	Utilizuotų CO ₂ dujų kiekis skirtingų grupių bandiniuose	59

Įvadas

Temos aktualumas

Betono gamybos procesas yra vienas iš didžiausių CO₂ dujų išmetimo šaltinių pramonės sektoriuje, kuris didina dujų koncentraciją ore, tuo pačiu sukeldamas šiltnamio efektą. Vis dažniau siekiama įtraukti statinio gyvavimo ciklo vertinimą, taip atsirenkant aplinkai draugiškesnes medžiagas. Vienas pagrindinių parametru yra globalinis atšilimo potencialas (GWP), įvertinantis išskiriamą CO₂ dujų kiekį į aplinką – gamybos, montavimo, eksploatacijos ir nugriovimo bei perdirbimo stadijose. Siekiant sumažinti išmetamų CO₂ dujų kiekį, visose pramonės sektoriuose stengiamasi ieškoti sprendimų, padėsiančių tai pasiekti. Anglies dioksido kiekiui mažinti siūloma tobulinti cemento gamybos technologijas, surinkti ir panaudoti iš naujo pramonines atliekas (šlakas, pelenai, medienos drožlės, klinkerio dulkės ir kt.), taip pat ieškoti alternatyvų, galinčių pakeisti cemento pagrindu gamintas konstrukcijas. Vienas iš potencialių sprendimų yra CO₂ dujų utilizavimas betoną kietinant – suteikiant betonui geresnes mechanines bei fizikines savybes.

Darbo tikslas –

žaliosios technologijos būdu pagaminti CO₂ dujomis kietintus plonasluoksni mineralinio kompozito bandinius ir ištirti jų fizikines ir mechanines savybes.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti mokslinę literatūrą apie gaminių gamybą žaliosios technologijos būdu, jų kietinimui panaudojant CO₂ dujas;
2. pagaminti skirtingos sudėties plonasluoksni kompozito bandinius su cementiniu rišikliu, dalį iš jų kietinti įprastu būdu, dalį – automatizuotoje CO₂ dujų kameroje;
3. pagaminti skirtingos sudėties plonasluoksni kompozito bandinius su kalkių rišikliu, dalį iš jų kietinti įprastu būdu, dalį – automatizuotoje CO₂ dujų kameroje;
4. nustatyti su cemento ir kalkių rišikliais pagamintų plonasluoksnių bandinių mechanines ir fizikines savybes;
5. atlikti gamyklinių trinkelinių kietinimą CO₂ aplinkoje ir nustatyti karbonizacijos įtaką standartinėms trinkelinių savybėms (atsparumas šalčiui, stipris tempiant skėlimu, vandens įgėrį ir dilumą);
6. apskaičiuoti CO₂ absorbcijos kiekį, kuris chemiškai surišamas bandinių karbonizavimo metu.

Mokslinis naujumas

Betoninių gaminių gamyba, juos prisotinant CO₂ dujomis nėra visiškai nauja technologija. Ši technologija pradėta tirti jau XX a. pirmoje pusėje, tačiau pastaruoju metu susilaukia vis didesnio dėmesio. Ši tema dar turi daug vietos tobulėti, kadangi būtina išsiaiškinti kintamųjų veiksnių (mišinio sudėtis, kietėjimo režimas, užpildo tipas, priedai, paruošimo procesas) įtaką CO₂ dujų kaupimo potencialui. Taip pat svarbu įvertinti ir galimą pH sumažėjimą, kietinant CO₂ dujomis, ypač jei konstrukcija armuojama – didesnė rizika korozijai atsirasti.

Praktinė vertė

Gaminių gamyba CO₂ kietinimo būdu gali sumažinti anglies dioksido kiekį aplinkoje, pagerinti mechanines ir fizikines savybes, tokias kaip atsparumas drėgmei, šalčiui, gniuždomasis stipris.

1. Literatūros analizė

1.1. Betonas

Betonas – tai viena dažniausiai naudojamų medžiagų įvairių statinių statyboje, pasižyminti dideliu gniuždymo stipriu, atsparumu vandeniui, ugniai, ilgaamžiškumu, pigumu, minimalia priežiūra bei lengva konstrukcijų gamyba ir statyba. Naudojant betoną galima išgauti įvairių formų ir dydžių konstrukcijas, o keičiant betono sudėtį galima pagaminti įvairių savybių betoną – lengvąjį, sunkųjį, architektūrinį, betoną su organiniais užpildais ar kt. Įprastas betonas susideda iš cemento rišiklio (portland cemento), vandens, užpildų, taip pat gali būti naudojami ir priedai koreguojantys betono formavimosi procesą [1]. Cementas yra dažniausiai naudojama betono rišamoji medžiaga, sudaranti apie 13% betono masės ir paprastai 10-15 % viso betono gaminio tūrio [2]. Ši medžiaga veikia kaip rišiklis sujungiantis visas medžiagas į vieną tvirtą betono akmenį. Užpildams gali būti naudojamos labai įvairios granuliuotos medžiagos: smėlis, žvyras, žvirgždas, skaldyti akmenys, organinės medžiagos, perdirbtų konstrukcinių medžiagų užpildai. Nuo užpildo frakcijos ir kiekio betone priklauso gautos konstrukcijos poringumas, tankis, vandens įgėris, tekstūra, stiprumas ir kitos mechaninės savybės [1].

Visas cemento ir betono gyvavimo ciklas – nuo gamybos iki griovimo – sudaro beveik 10 % viso pasaulyje išmetamo CO₂ kiekio (2019 metų duomenimis), didžiąją dalį šių dujų išskiria cemento gamyba [2]. Klimato kaita, dėl kurios kyla daugybė ekstremalių orų reiškinių, pavyzdžiui atogrąžų audros, potvyniai ir sausros yra padidėjusio antropogeninio šiltnamio efektą sukeliančių dujų, ypač CO₂ dujų, išmetimo rezultatas. Daug anglies dioksido dujų išmetama dėl kalkakmenio skilimo ir iškastinio kuro deginimo procesų, vykstančių gaminant cementą, tad anglies dioksido surinkimas, panaudojimas ir kaupimas yra labai svarbi cemento gamybos metu išmetamų teršalų mažinimo technologija [3]. Stengiamasi ieškoti tvaresnių gaminių gamybos sprendimų, kurie padėtų sumažinti neigiamą poveikį aplinkai gaminant konstrukcines medžiagas [1, 4]. Mehta [1] teigia, kad svarbu tobulinti konstrukcijas, kad jų gyvavimo ciklas būtų prailgintas iki 500 metų, o ne 50-ies – tai 10 kartų padidintų žaliavų našumą. Siekiant tvarumo, Mehta skatina betoną gamybai naudoti perdirbtas medžiagas: šlaką, pelenus, kurie yra laikomi pramoninėmis atliekomis, taip pakeičiant iki 80 % cemento svorio. Pasak Mehta, šios alternatyvos sumažintų CO₂ suvartojimą ir išmetimą į aplinką [5, 6]. Vis dažniau yra atliekami bandymai, kurių metu gaminant betoną panaudojami degimo produktai tokie kaip pelenai, anglis, kalkės, CO₂ dujos ir taip kompensuojamas į orą išmestas CO₂ dujų kiekis gaminant cementą [1]. Naudojant CO₂ dujas galima ne tik kontroliuoti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą, bet ir gauti atsinaujinančios švarios energijos, todėl CO₂ dujų utilizavimo technologija yra svarbi anglies dioksido išmetimo kontrolei [7].

1.2. Gaminių gamyba

Formavimas – viena svarbiausių operacijų, kurios metu betono mišiniui yra suteikiama forma, jei reikia – jis sutankinamas. Formavimo būdas priklauso nuo betono mišinio slankumo bei gaminamos konstrukcijos tipo. Pagrindiniai formavimo būdai: vibroformavimas, presavimas, volavimas, plūkimas, centrifugavimas, liejimas, sudėtiniai būdai [8]. Skyriuje detaliau apibūdinti presavimo, liejimo ir vibroformavimo metodai.

1.2.1. Liejimas

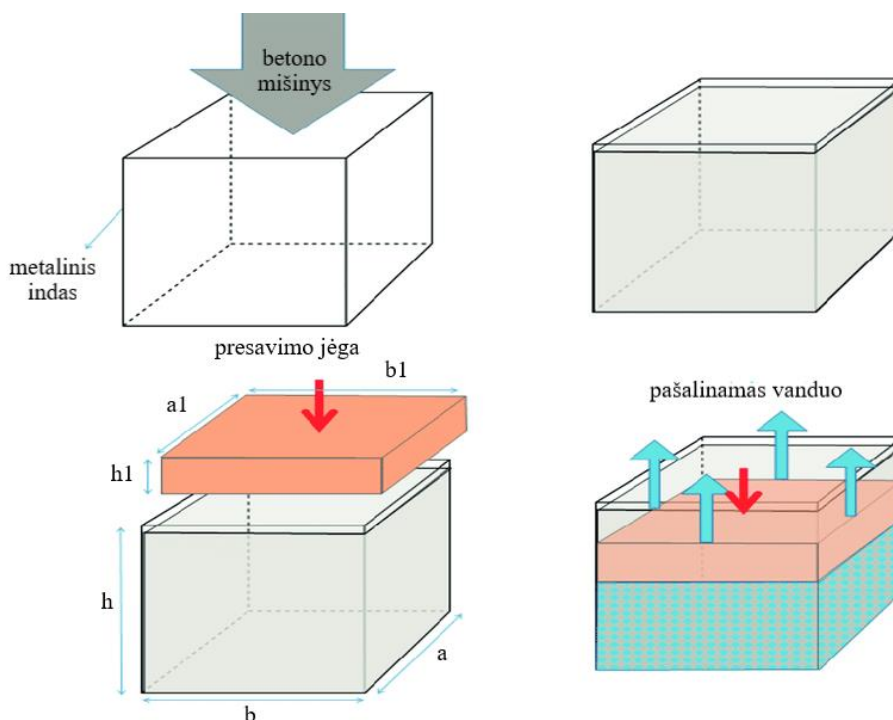
Formuojant liejimo būdu, vandens ir kietųjų medžiagų santykis betone būna nuo 0,4 iki 0,7. Šis būdas taikomas aktyvųjų betonų ir gipsinių dirbinių gamyboje, kadangi užpildai gali būti tik smulkūs, o gaminiai pasižymi dideliu poringumu ir mažu stiprumu [8].

1.2.2. Vibroformavimas

Vibruojant mišiniui suteikiami mechaniniai virpesiai, dėl kurių sumažėja trintis tarp dalelių ir jos pasislenka viena kitos atžvilgiu. Smulkesnės dalelės užpildo tarpus esančius tarp didesnių dalelių. Formuojant mišinius šiuo metodu svarbu atsižvelgti į vibravimo dažnį, amplitudę ir trukmę [8].

1.2.3. Presavimas

Presavimas efektyvus esant standiems ir pusiau standiems mišiniams [8]. Pagrindiniai faktoriai, lemiantys betono gniuždomojo stiprio padidėjimą: mažas vandens ir cemento santykis (V/C), smulkių užpildų naudojimas bei šlapio betono presavimas oro tarpams pašalinti. Vienas geriausių smulkių užpildų yra silicio milteliai, kurie betonui suteikia didesnę gniuždomąją stiprį bei ilgaamžiškumą [9].



1 pav. Šlapio betono presavimas [9]

Pussausio presavimo technologija dažniausiai naudojama keraminiams gaminiams gaminti – plytoms, čerpėms, ugniai atspariai keramikai, taip pat nedidelių matmenų betono gaminiams gaminti (plytelėms, šaligatvio bortams, silikatinėms plytoms). Formuojant skirtingus gaminius šiuo metodu, mišinio drėgmė gali būti labai įvairi: keraminėms plytoms 8-12 %, ugniai atspariems gaminiams 4-11 %, silikatinėms plytoms 7-9 %, betoniniams gaminiams 7-10 %. Presavimo metu, mišinyje esantis difuzinio sluoksnio vanduo yra išspaudžiamas į tarpporinę erdvę, o oras iš mišinio pasišalina per formoje esančius tarpus, todėl didelių slėgių neatsiranda. Gaminant gaminius pussausio presavimo metodu dėl nenuoseklaus presavimo, mišinio nehomogeniškumo, nevienodo supresavimo laipsnio ar slėgio pokyčio sluoksniai gali pasislinkti vienas kito atžvilgiu ir atsirasti išsisluoksniavimo plyšiai gaminių šonuose [10].

1.3. Karbonizacijos technologija

Karbonizacija – tai vykstanti mineralizacija tarp CO₂ ir šarminių metalų (kalcis, magnis ir kt.) esančių betono mišinyje, kurios metu susidaro karbonatai, sutankinantys betono struktūrą ir padidinantys jo stiprumą. Kadangi CO₂ dujų kiekis ore yra labai mažas, apie 0,03-0,04 %, natūrali karbonizacija vyksta lėtai [11, 12]. Liang C. ir kt. [12] atlikto tyrimo metu pastebėta, kad C30/37 stiprio betono natūrali karbonizacija per 20 ir 80 metų atitinkamai buvo tik 10 ir 20 mm. Betono gaminių gamybą, kietinimui panaudojant CO₂ dujas, galima vadinti žaliaja gamybos technologija, nes tai yra efektyvus būdas sumažinti anglies dioksido kiekį aplinkoje. Kietinimas dirbtiniu būdu naudojant CO₂ dujas (angl. CO₂ curing) – tai toks procesas, kurio metu betono gaminiai yra kietinami užtikrinant tinkamas temperatūros, slėgio, drėgmės ir CO₂ kiekio sąlygas, reikalingas vykti mineralizacijai [12, 13].

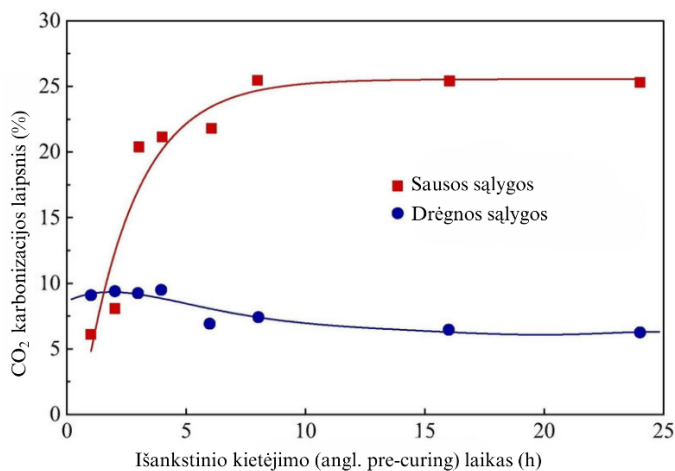
Yra 2 karbonizacijos rūšys – pasyvi ir aktyvi. Pasyvi karbonizacija – tai procesas, kurio metu natūraliomis aplinkos sąlygomis, sukeliama nenuspėjami cemento gaminių pokyčiai paviršiaus sluoksniuose ir porose. Paprastai toks karbonizacijos procesas vyksta etapais: a) CO₂ absorbcija ir CO₃²⁻ susidarymas; b) šarminių metalų pasišalinimas skysčio pavidalu; c) mažai tirpus karbonato CaCO₃ susidarymas ir nusėdimas porose. Aktyvi karbonizacija tai dirbtinai sukeliama karbonizacijos procesas, kurio metu užtikrinamos optimalios sąlygos karbonatams formotis greičiau. Kietinant dirbtiniu būdu bandiniai yra veikiami didelėmis CO₂ dujų koncentracijomis, todėl šias dujas pasisavina greičiau ir didesniais kiekiais [14]. Tačiau ši technologija turi ir keletą sunkumų: karbonizuojant reikalingas mažas V/C (vandens ir cemento) santykis, o karbonizacijos reakcija vyksta tik medžiagos paviršiuje; karbonizacijos statybvietyje atlikti neįmanoma, dėl aukšto slėgio įrenginių poreikio [15]. Nepaisant šių technologijos sunkumų, betoniniams gaminiams karbonizuoti yra naudojami keli metodai [16]: standartinis, slėginis, tėkmės bei vandens. Šie metodai aptarti tolimesniuose poskyriuose.

1.3.1. Bandinių paruošimas karbonizacijai

Paruošimas karbonizacijai (angl. pre-curing) yra labai svarbus žingsnis, kadangi karbonizacijos efektyvumo laipsnis priklauso nuo vandens kiekio bandiniuose. Jei bandinys karbonizuojamas iš karto po formavimo (liejimo būdu), karbonizacija yra neefektyvi ir vyksta lėtai, dėl to svarbu atsižvelgti į laiko trukmę ir sąlygas, kurioms esant bandinys kietėja. Taip yra todėl, nes dujų prasiskverbimo greitis vandenyje yra 10 000 kartų mažesnis nei sausomis poromis. Gaminių paruoštų sąlyginai sausoje aplinkoje (20-25 °C temperatūra ir 40-60 % santykinė drėgmė) karbonizacijos procesas vyko greičiau, lyginant su drėgnoje aplinkoje (didesnė nei 95 % santykinė drėgmė) paruoštais gaminiais. Kaip matoma 2 pav. drėgnoje aplinkoje karbonizacija pirmąsias 2 valandas vyksta greičiau, tačiau po 2 valandų, karbonizacija sausomis sąlygomis vyksta du kartus greičiau. Shi ir kiti [16] ištyrė, kad pagrindinis veiksnys, turintis įtakos CO₂ absorbcijai buvo drėgmės praradimas, o ne paruošimo laikas.

Nors atliekant bandymus ir kietinant cemento bandinius CO₂ dujomis buvo užtikrintos optimalios sąlygos, cemento klinkeris pilnai sureaguoti su anglies dioksido dujomis negalėjo, dėl susidariusio tankaus karbonatų sluoksnio paviršiuje, kuris trukdo tolesnei gaminio karbonizacijai. Atliktuose bandymuose, pastebėta, kad sausomis sąlygomis gniuždomasis stipris per pirmąsias 7 paras labai padidėjo, o per sekančias 14 parų, pakito labai minimaliai. Palyginimui buvo atliktas tyrimas, kuriame bandiniai buvo 18 valandų laikomi plastikiniame maišelyje, kad būtų išvengiama džiūvimo. Praėjus 18 valandų bandiniai patalpinti į vandenį, siekiant įvertinti, ar tolesnė karbonizacija vandenyje gali

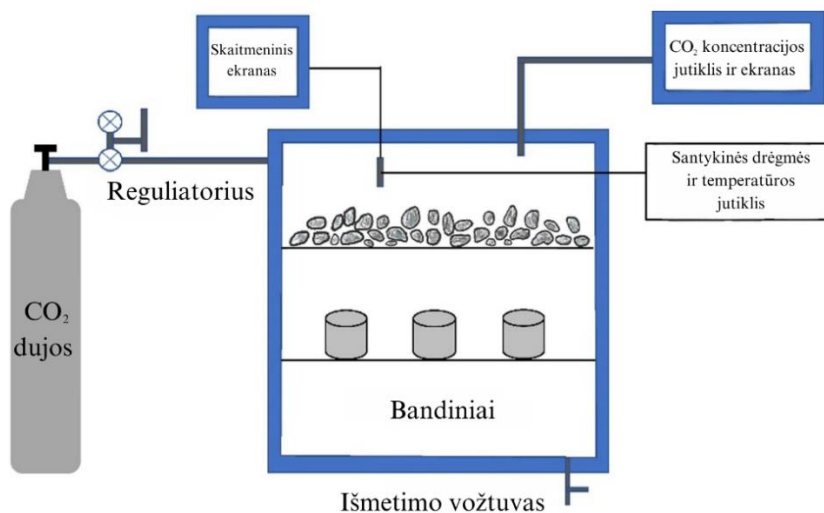
padidinti stiprumą. Rezultatai parodė, kad kietinimas vandeniui, padidino 1 paros bandinio gniuždymo stiprumą 30 %. Nors betono gniuždomasis stipris kietinant vandenyje vyko lėtai, tačiau laikui bėgant pastoviai didėjo. Taip pat buvo nustatyta, jog CO₂ karbonizacijos technologija gali būti naudojama ir perdirbto betono užpildams apdoroti, taip sumažinant jų vandens įgėrį ir poringumą [17].



2 pav. Karbonizacijos laipsnio priklausomybė nuo išankstinio kietėjimo laiko [16]

1.3.2. Standartinis metodas

Karbonizuojant gaminius standartiniu metodu (angl. standard CO₂ curing), CO₂ dujų koncentracija yra padidinama, o slėgis lygus aplinkos slėgiui. Karbonizacija atliekama CO₂ kameroje, kurią naudojant gaunamas panašus rezultatas į karbonizacijos testą aprašytą Kinijos standarte GB50082-2009 [18]. Bandiniai patalpinami į CO₂ kamerą, kurioje palaikomos pastovios sąlygos: temperatūra 20 ± 2 °C; santykinė drėgmė 70 ± 5 % ir CO₂ koncentracija 20 ± 3 %. Dėl kameroje palaikomo pastovaus aplinkos slėgio karbonizacijos efektyvumas yra mažas ir užtrunka ilgai [16].

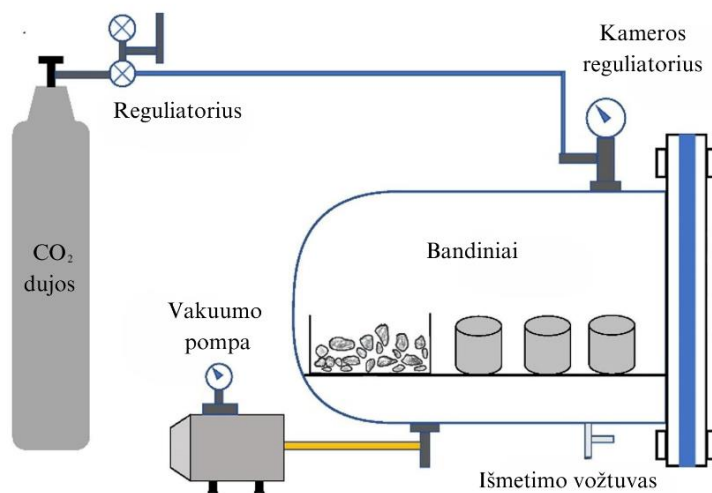


3 pav. Standartinio karbonizacijos metodo schema [16]

1.3.3. Slėginis metodas

Karbonizuojant gaminius slėginiu metodu (angl. pressurized CO₂ curing), CO₂ koncentracija ir slėgis yra padidinami, lyginant su natūralia karbonizacija. Dažniausiai CO₂ koncentracija dujų balione yra ~99,5 %. Prieš pradėdant karbonizaciją, slėgis kameroje vakuuminio siurbliu nustatomas iki neigiamo slėgio (apie -0,1 MPa) ir palaikomas ~2-3 min. Galutinis slėgis CO₂ kameroje turi būti didesnis nei

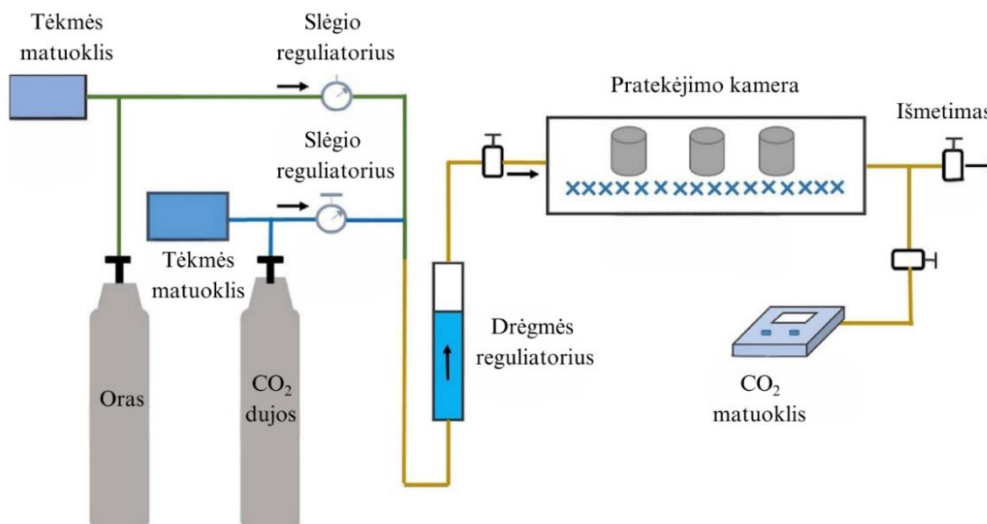
aplinkos slėgis (apie +0,1 MPa) ir yra kontroliuojamas dujų reguliatoriumi. Lyginant su standartiniu metodu, slėginiame metode naudojamas aukštas slėgis, pagreitinantis karbonizacijos procesą, todėl šis metodas dažniausiai naudojamas neseniai pagamintiems gaminiams [16]. Atlikti tyrimai rodo, jog per pirmąsias 2 valandas karbonizuojant CO₂ dujomis, buvo pasiektas aukštas karbonizacijos laipsnis ir didelis gniuždymo stipris, tolesnė karbonizacija buvo mažiau efektyvi. Temperatūros ir santykinės drėgmės svyravimai turėjo labai minimalią įtaką karbonizacijos procesui, tačiau CO₂ dujų koncentracijos įtaka buvo reikšminga [19].



4 pav. Slėginio karbonizacijos metodo schema [16]

1.3.4. Tėkmės metodas

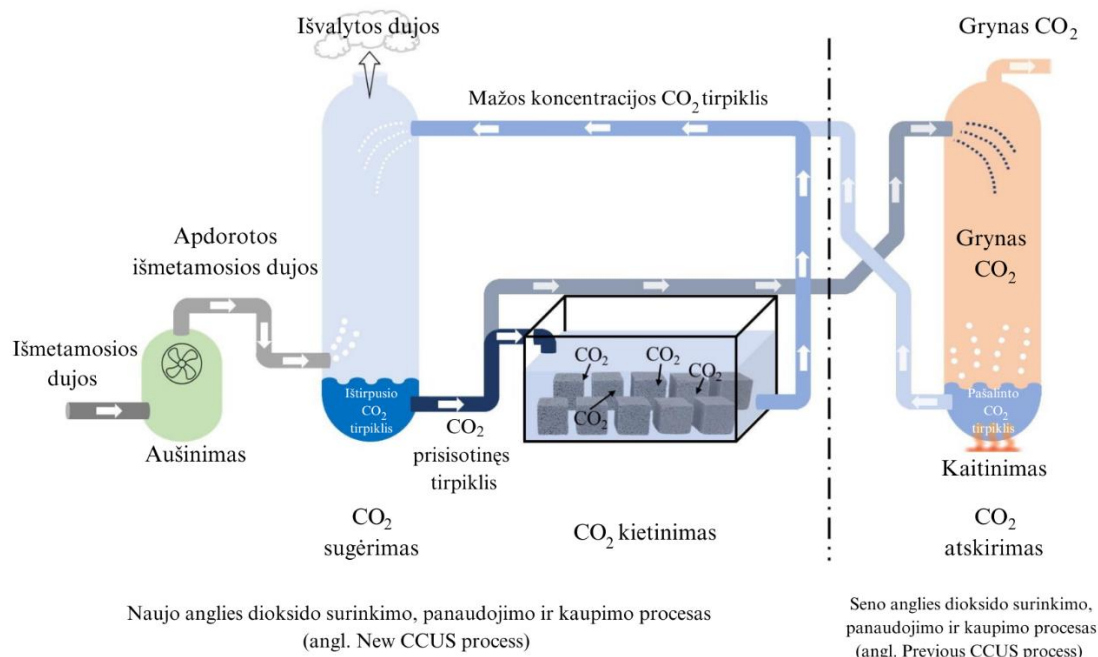
Tėkmės metodas (angl. flow-through CO₂ curing) paremtas dujų tėkmės principu. CO₂ dujos yra sumaišomos su oru ir įpurškiamos į kietėjimo kamerą, dalis dujų susigeria į bandinį (greičiau nei kitais metodais), o likusios dujos pašalinamos kitoje mechanizmo pusėje. Taikant šį metodą yra reguliuojama santykinė drėgmė, temperatūra, koncentracija ir tėkmės greitis. Santykinė drėgmė gali būti kontroliuojama naudojant Mg(NO₃)₂, NaCl ar K₂SO₄ tirpalus (50 %, 75 % ar 98 %). Šiuo metodu karbonizacijos efektyvumas ženkliai padidinamas ir gaminys gali būti greitai karbonizuotas [16]. Atlikti tyrimai rodo, kad nors ir ankstyvame karbonizacijos amžiuje karbonizacijos laipsnis buvo mažesnis nei slėginio metodo metu, o po 24 valandų kietėjimo, gauti rezultatai buvo panašūs [19].



5 pav. Tėkmės karbonizacijos metodo schema [16]

1.3.5. Vandens ir CO₂ dujų metodas

Kitaip nei prieš tai minėtuose metoduose, šiame yra naudojamos vandenyje ištirpusios CO₂ dujos, šiam karbonizacijos metodui nereikia didžiulių CO₂ kamerų, sukuriančių vidutinį slėgį. Metodui ištirti buvo naudojamas kalio hidroksido (KOH) vandens tirpalas į kurį buvo panardinami šlako skiedinio bandiniai. Buvo nustatyta, kad efektyviausia karbonizacija vandenyje buvo pirmąsias 3 paras, tačiau galutinio stiprumo nebuvo pasiekta. Po 28 parų, mėginių stiprumas buvo padidėjęs, kaip ir CO₂ dujų utilizavimas [12, 20].



6 pav. Vandens ir CO₂ karbonizacijos metodo schema [20]

1.3.6. Po bandinių kietinimo

Kadangi paruošimo karbonizacijai metu ar po karbonizacijos bandiniuose gali atsirasti vandens trūkumas, o trumpalaikės karbonizacijos metu bandinyje pilna karbonizacija neįvyksta, bandinius galima dėti į vandenį, kad būtų kompensuojamas vandens trūkumas ir būtų sudarytos sąlygos tolesnei nesuragavusio cemento klinkerio hidratacijai. Neutralizacijos reakcija tarp CO₂ ir Ca(OH)₂ lemia šarmingumo sumažėjimą. Siekiant užtikrinti tolesnę hidrataciją, kad pH taptų didesnis nei 12, turi būti užtikrintas didesnis nei 95 % santykinis drėgnis. Vėlesnis bandinių kietinimas prisideda prie ilgalaikio betono stiprumo padidėjimo bei medžiagos mikrostruktūros kompaktiškumo [16].

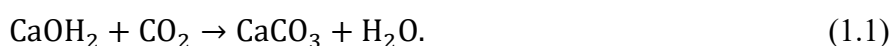
1.4. Cheminiai karbonizacijos procesai skirtingose medžiagose

Šiame skyriuje kalbama apie karbonizacijos procesus, vykstančius skirtingose medžiagose (portland-cementis, nehidrauliniai kalcio silikatai, pramoninės atliekos, magnio pagrindu pagamintos medžiagos), jas veikiant CO₂ dujomis. Kadangi statybos pramonė yra vienas pagrindinių aplinkoje esančių CO₂ dujų šaltinis, svarbu šias dujas panaudoti, taip išgaunant vertingus produktus (sintetinį kurą, polimerus ir kt.) ar termodinamiškai stabilius produktus (karbonatų mineralus), skirtus ilgalaikiam CO₂ kaupimui, taip užkertant kelią šių dujų patekimui į aplinką. Geologinis ir jūrinis CO₂ dujų kaupimas buvo naudojamas jau kelius dešimtmečius, tačiau gaminių karbonizacija turi vis didesnį potencialą siekiant sumažinti CO₂ kiekį, tuo pačiu sustiprinant betono gaminius.

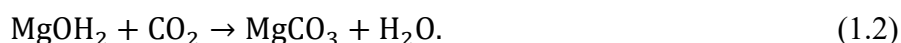
Karbonizacija gali būti naudojama šviežiams arba sukietėjusiems portland-cementčio betono gaminiams. Šio proceso greičiui ir efektyvumui įtakos turi medžiagos savybės, cheminė sudėtis, palankių sąlygų sudarymas (CO₂ koncentracija, slėgis, temperatūra). Taip pat karbonizacija gali būti naudojama siekiant pagerinti perdirbtų užpildų kokybę ir padidinti dirbtinių užpildų stiprumą.

Karbonizacija paprastai vyksta tarp šarminių kietųjų medžiagų, kai kalcio (Ca) ar magnio (Mg) turinčios medžiagos reaguoja su CO₂. Tokia reakcija gali vykti natūraliai esant aplinkos temperatūrai ir slėgiui, kuomet įvykus cheminei reakcijai tarp kalcio (ar magnio) ir anglies dioksido pradeda formuotis karbonato (CaCO₃) kristalai – valeritas, aragonitas ir kalcitas. Tokiu pačiu principu karbonizuojasi ir magnis į magnezitą, tačiau ši cheminė reakcija vyksta sunkiau, dėl mažiau palankių aplinkos sąlygų [21]. Tačiau natūrali karbonizacija mažina betono pH, t.y., jį rūgština, sukeldamas armatūros koroziją. Karbonizacijos metu betonas tankėja, išstumdamas dalį vandens. Cheminė reakcija tarp kalcio hidroksido ir anglies dioksido [22] pateikiama (1.1) formulėje, o cheminė reakcija tarp magnio hidroksido ir anglies (1.2) formulėje.

Cheminė reakcija tarp kalcio hidroksido ir anglies dioksido [22]:

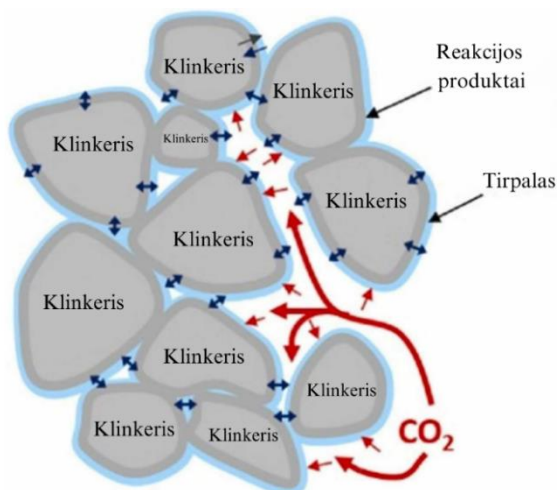
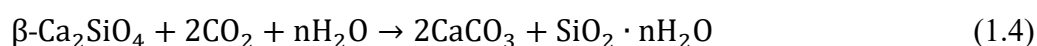
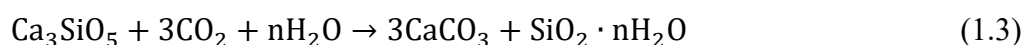


Cheminė reakcija tarp magnio hidroksido ir anglies dioksido [23]:



1.4.1. Portland cementas (hidraulinė medžiaga)

Kai cementas ir betonas yra veikiami CO₂ aplinkos, CO₂ dujos prasiskverbia į medžiagą per poras ir plyšius, reaguodamos su pirminiais hidratacijos produktais ir sudarydamos CaCO₃ ir SiO₂ (angl. silica gel). Kalcio silikatai (C₃S ir C₂S) ir jų hidratacijos produktai (CaOH₂ ir kalcio silikato hidratas C-S-H gelis) sudaro daugiau kaip 60 % hidratuoto Portland cemento sudėties. Skirtingi polimorfiniai bevandeniai mineralai alitas (C₃S) ir belitas (C₂S) reaguodami su CO₂, sudaro karbonatus bei išskiria silikagelį. Šių reakcijų cheminės lygtys pateikiamos (1.3) ir (1.4) lygtyse [21, 23]:

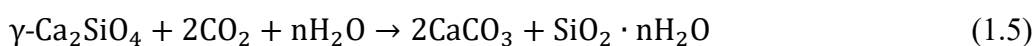


7 pav. Cementinių medžiagų karbonizacijos schema [21]

Cemento hidratacijos metu bevandenės cemento dalelės ištirpsta vandenyje ir sudaro vientisą hidratuotą medžiagą. Dėl to medžiagos tūris didėja, sumažėja poringumas ir medžiaga sukietėja. Karbonizacija yra sudėtingesnė reakcija nei hidratacija, nes jai vyksti reikalingas CO₂ transportavimas ir sąveika su cementu. Karbonizacijos metu cementas yra veikiamas CO₂ aplinkos, CO₂ dujos prasiskverbia į medžiagą per poras ir plyšius, reaguodamos su pirminiais hidratacijos produktais ir sudarydamos CaCO₃ ir SiO₂ (angl. silica gel) [12, 21]. Panašiai kaip ir hidratacijos procese, karbonizacijos procesas padidina medžiagos tūrį, sumažina poringumą ir pagerina mechanines savybes. Dėl portland-cemento įmirkimo ir smulkaus poringumo, karbonizacija aplinkos sąlygomis vyksta lėtai, nes sutrinka CO₂ difuzija [21].

1.4.2. Nehidrauliniai kalcio silikatai

Lyginant hidraulinius (C₃S) ir nehidraulinius kalcio silikatus (γ-C₃S, C₃S₂, CS), nehidraulinių kalcio silikatų hidratacija yra sąlyginai lėta, todėl susidaro mažesni kiekiai portlandito (Ca(OH)₂). Karbonatų formavimosi metu vykstančios cheminės reakcijos pateiktos (1.5) ir (1.6) formulėse [21]:



CO₂ dujos reaguodamos su nehidrauliniais kalcio silikatais sudaro karbonatus ir silikagelį, kurie veikia kaip rišikliai. Tačiau norint pasiekti gerų medžiagos savybių su šiomis medžiagomis, CO₂ dujų koncentracija turi būti didelė, kitu atveju, karbonizacija vyksta lėtai.

1.4.3. Pramoninės atliekos

Kietosios pramoninės atliekos – metalo šlakas, pelenai, kasyklų atliekos, cemento klinkerio dulkės ir kt. – tai gamybos proceso metu (metalo apdirbimo, kasybos, anglies degimo, cemento gamybos ir kitų) gauti šalutiniai deginimo produktai. Kiekvienoje iš šių atliekų yra šarminių mineralų, tokių kaip kalcis, magnis, aliuminis, kurie gali karbonizuotis reaguojant su CO₂ dujomis. Pagrindinė problema, trukdanti naudoti pramonines atliekas karbonizacijai yra lėtas proceso greitis, susijęs su atliekų nevienalytiškumu. Didžioji dalis kalcio ir magnio elementų nėra tinkamos cheminės sudėties, nes turi silikatų ar sudėtingas oksidines jungtis [21].

Metallų šlakai – viena pagrindinių atliekų, gaunamų gaminant metalines konstrukcijas, kuriuos pastaruoju metu stengiamasi panaudoti betono gamybos procese. Šie šlakai turi didelį karbonizacijos efektyvumą dėl junginiuose esančių silikatų gali efektyviai kaupti anglies dioksidą. Atliekant karbonizaciją galima sumažinti sunkiųjų metallų išplovimą iš plieno šlako ir pagerinti mechanines betono savybes [24].

1.4.4. Magnio pagrindu pagamintos cementinės medžiagos

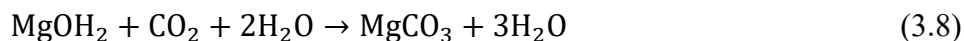
Ieškant alternatyvų, didėja susidomėjimas MgO panaudojimu kaip alternatyva CaO rišikliui, gaminius kietinant CO₂ kameroje. Magnio oksidas pasižymi gebėjimu kaupti CO₂ dujas, bei karbonizuotis žemesnėje temperatūroje (700-1000 °C susidaro MgCO₃, o CaCO₃ mineralo susidarymui reikia 1450 °C). Cemento su MgO karbonizacija pagrįsta, magnio oksido hidratacija, kurios metu susidaro brucitas (Mg(OH)₂). Kitaip nei portland-cementas, gautas hidratuotas mineralas

pasižymi porėta struktūrą ir dėl to medžiagos stiprumui įtakos beveik nedaro. Hidratacijos ir karbonizacijos cheminės reakcijos pateiktos (3.7) ir (3.8) formulėse [21]:

Magnio oksido hidratacija:



Magnio hidroksido karbonizacija:



1.5. Riškiai

Įprastai statybose naudojamas paprastas portland-cementas (OPC), tačiau ieškant tvaresnių ir mažiau kenksmingų medžiagų yra naudojamos įvairios pramoninės atliekos, kitaip vadinamos geopolimerais. Tai alternatyvi rišamoji medžiaga, kurios pagrindą sudaro lakieji pelenai aktyvuojami šarminiu aktyvatoriumi, bei į aplinką išmetantys mažesnę kiekį CO₂ dujų. Turner ir kt. [25] atliko išsamų geopolimerinio ir OPC betono anglies dioksido pėdsako skaičiavimą visu betoninių gaminių gamybos laikotarpiu (gamyba, transportavimas ir statyba).

Gaminant betoną su OPC riškliu, daugiausia anglies dioksido išmetama gaminant patį portland-cementą – 76,4 %. Norint pasiekti optimalias mechanines ir fizikines savybes gaminant betoną su geopolimeriniu riškliu būtina naudoti šarmų aktyvatorius, kurių gamybos metu išskiriami taip pat dideli kiekiai CO₂ dujų. Apskaičiuota, kad gaminant betoną su geopolimeriniu riškliu bendras išmetamų teršalų kiekis – 320 kg CO₂-e/m³, o su OPC riškliu – 354 kg CO₂-e/m³, t.y. 9 % skirtumas [25].

1.6. Karbonizacijos įtaka pagrindinėms betono savybėms

Siekiant ištirti, kaip betono savybės kinta jį karbonizuojant buvo atlikti bandymai. Bandymų metu buvo užtikrinamos pastovios optimalios sąlygos – CO₂ dujų koncentracija, CO₂ dujų slėgis, trukmė, drėgmė, temperatūra [26].

1.6.1. Gniuždomasis stipris

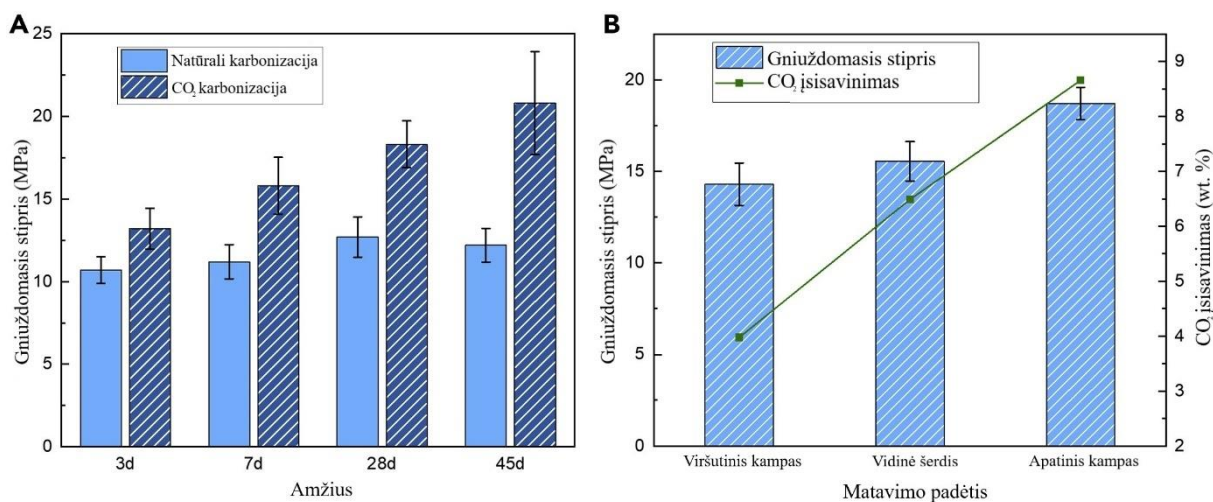
Wang ir kt. [27] atlikto bandymo metu buvo nustatyta, kad 3 paras CO₂ dujomis kietinto betono gniuždomasis stipris buvo didesnis už gniuždomąjį stiprį, betoną kietinant vandenyje. Betono bandinių, po 28 ir 90 parų kietinimo abiem metodais, gniuždomųjų stiprių reikšmės buvo panašios.

Kumar ir kt. [28] atliko panašų tyrimą, lyginant betono bandinių kietinimą CO₂ aplinkoje bei vandenyje. Gniuždomasis stipris po 8 valandų kietinant CO₂ kameroje buvo 90 % didesnis, nei stiprio, pasiekto kietinant vandenyje.

Kamal ir kt. [29] atlikto tyrimo metu buvo nustatyta, kad CO₂ dujų kameroje kietinam betono mišiniui reikia daugiau vandens, nei mišiniui į kurį CO₂ dujos buvo įpurškiamos. Kalbant apie stiprumą, buvo įrodyta, kad CO₂ kietinimas padidina betono gniuždymo stiprumą, taip yra dėl vandens santykio bandiniuose bei tuštumų ir porų užsipildymo kalcio karbonatais kietėjant.

Wang ir kt. [30] atliko tyrimą su betoniniais blokais siekiant įvertinti ir palyginti kaip kinta CO₂ dujomis kietinto betono gniuždomasis stipris laikui bėgant bei kaip skiriasi CO₂ pasisavinimas ir gniuždomojo stiprio dydis skirtingose bloko dalyse. Laikui bėgant, CO₂ dujomis kietintas betonas

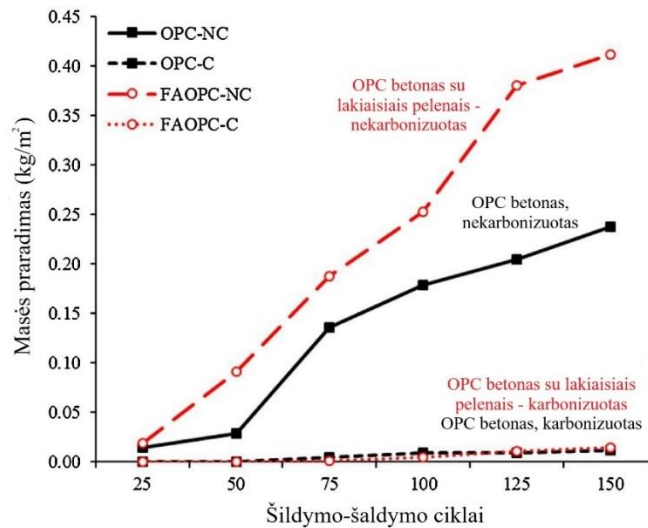
išliko stipresnis gniuždant visais bandymo laikotarpiais. Dėl vėlesnės hidratacijos CO₂ dujomis kietinto betono stipris siekė 15 MPa, o per kitas 4-5 savaites padidėjo iki daugiau nei 20 MPa. Gniuždomojo stiprio pokytis pavaizduotas 8 A paveiksle, o gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo matavimo vietos erdvinės padėties pavaizduota 8 B paveiksle.



8 pav. Gniuždomasis stipris blokuose: A - kitimas bėgant laikui, B - priklausomybė nuo bloko dalies [30]

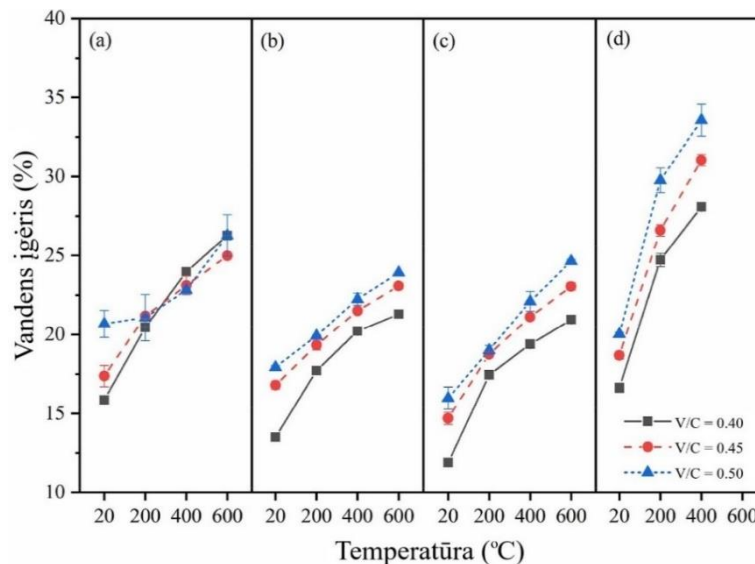
1.6.2. Atsparumas šalčiui

Zhang ir kt. [31] atliko tyrimą siekdami iširti CO₂ kietinimo įtaką atsparumui nuo šalčio. Betono paviršiaus pleišėjimo bandymas buvo atliktas bandinių cikliškai veikiant šildymo-šaldymo ciklais. Betono bandiniai su skirtingomis sudėtimis buvo kietinami 28 paras (5 h kietėjimas formoje, 5,5 h kietėjimas išformavus, 12 h kietėjimas CO₂ kameroje ir 27 paras kietinama vandenyje hidratuojant bandinius), po kurių 21 parą buvo laikomi 20 ± 2 °C temperatūroje ir 65 % santykinės drėgmės aplinkoje. Natūraliai išdžiūvę bandiniai buvo pasverti ir panardinti į 3 % natrio chlorido tirpalą, kad būtų pasiekta drėgmės pusiausvyra. Šildymo-šaldymo ciklai vyko kasdien, 18 valandų užšaldant ir 6 valandas atšildant. Ciklų temperatūra svyravo nuo -20 °C iki 20 °C. Bandinių masės praradimas buvo matuojamas kas 25 ciklus iki 150 ciklo. Bandymo metu pastebėta, kad kietinimas CO₂ dujomis sumažino betono bandinių paviršiaus pleišėjimą. Po 150 šildymo-šaldymo ciklų, nekarbonizuotų bandinių paviršiuje, buvo galima pastebėti užpildą, atplaišas, nutrupėjimus. Priešingi rezultatai pastebėti karbonizuotuose bandiniuose, kadangi jų paviršius atrodė beveik nepakitęs. Taip pat tyrimo metu pastebėta, kad dėl kietinimo CO₂ dujomis, padidėja ankstyvojo amžiaus betono stiprumas, kuris lemia betono atsparumą tempimo įtempiams ir plyšiams, kuriuos sukelia tūrio plėtimasis ledo kristalizacijos metu, ypač ankstyvame betono amžiuje. Betono bandinių masės praradimo priklausomybė nuo šildymo-šaldymo ciklų kiekio parodyta 9 paveiksle.



9 pav. Betono bandinių masės praradimas veikiant šildymo-šaldymo ciklams [31]

1.6.3. Vandens įgėris



10 pav. V/C ir CO₂ dujų kietinimo laiko įtaka vandens įgėriui, kietinant skirtingose temperatūrose: (a) - 1 parą karbonizuoti bandiniai, (b) - 7 paras karbonizuoti bandiniai, (c) - 28 paras karbonizuoti bandiniai, (d) - 28 paras vandenyje kietinti bandiniai [32]

Yu ir kt. [32] atliko tyrimą, siekiant išsiaiškinti, kaip skirtingas vandens ir cemento (V/C) santykis, skirtingas kietinimo laikas ir temperatūra gali paveikti betono bandinių gebėjimą sugerti vandenį. 1 parą CO₂ dujomis kietintų bandinių pradinis vandens įgeriamumas buvo panašus į 28 paras vandenyje kietintų bandinių, tai įrodo, kad karbonizacijos produktai labai efektyviai užpildo kapiliarines poras ir neleidžia vandeniui prasiskverbti į bandinį. Pastebėta, kad pradinis vandens įgėris mažėja ilgėjant kietinimo CO₂ dujomis trukmei iki 28 parų ir didėja didinant V/C santykį [32].

Veikiant aukštai temperatūrai vandens įgėris gerokai padidėjo, taip įvyko dėl laisvos struktūros, kurią sukėlė hidratacijos ir karbonizacijos produktų skilimas, taip pat ir betono traukumas ir mikroįtrūkimų susidarymas. Tačiau kietinant betoną 28 paras 20-600 °C temperatūroje, vandens įgėrį galima sumažinti [32].

1.6.4. pH lygis

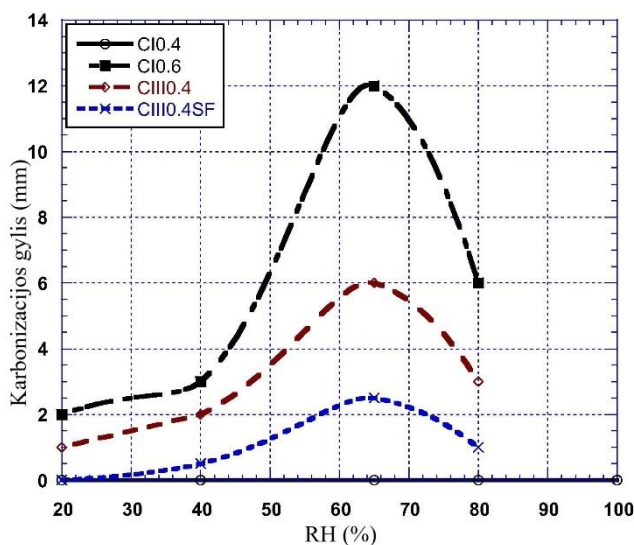
Prisotinant betoną CO₂ dujomis jis rūgštėja ir jo pH mažėja, todėl svarbu ištirti kaip kinta betono gaminių pH juos kietinant. Li ir kt. [33] atlikto tyrimo metu buvo nagrinėti CO₂ dujomis ir vandenyje kietinti betoniniai gaminiai. Matavimai buvo atliekami skirtingose bandinių dalyse. Praėjus vienai parai po karbonizacijos proceso, pastebima karbonizacija 0-10 mm ir 10-20 mm diapazonuose, o 20-30 mm intervale karbonizacija vyko minimaliai. Dėl didelio drėgmės kiekio, CO₂ dujos gilesnių sluoksnių nepasiekė ir 30-50 mm intervale karbonizacija nevyko. Pastebėta, kad tolesnio kietėjimo metu pH lygis betono paviršiuje stabilizuojasi ir padidėja iki 12.

Betono bandiniai	Amžius	pH vertės skirtingose bandinių dalyse				
		0-10 mm	10-20 mm	20-30 mm	30-40 mm	40-50 mm
Karbonizuoti	1 d	9.0-9.3	9.6-10.2	11.1-13.0	12.8-13.1	12.9-13.0
	28 d	12.1-12.6	12.5-12.8	12.5-12.8	12.9-13.1	12.9-13.1
Kietinti vandenyje	1 d	12.5-12.8	12.6-12.9	12.8-13.1	12.9-13.0	12.9-13.0
	28 d	12.6-12.9	12.8-13.0	12.9-13.0	12.9-13.1	12.9-13.1

11 pav. Betono bandinių pH lygiai [33]

1.7. Sąlygų įtaka karbonizacijos efektyvumui ir savybėms

1.7.1. Santykinė oro drėgmė

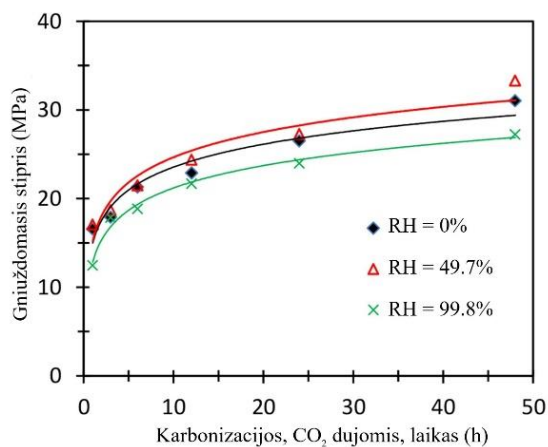


12 pav. Skirtingų betono sudėčių ryšys tarp RH ir karbonizacijos gylio [34]

Santykinė oro drėgmė yra vienas svarbiausių veiksnių, darančių įtaką karbonizacijos gyliui: karbonizacijos gylis didėja didėjant santykiniai drėgmei ir pasiekia didžiausią vertę kai santykinė drėgmė yra 65 % nepriklausomai nuo cemento tipo, kaip parodyta 12 paveiksle. Taip pat gerai žinoma, kad didėjant vandens ir cemento santykiui betone, labai pablogėja betono pralaidumas ir dėl to didėja betono karbonizacijos gylis [34].

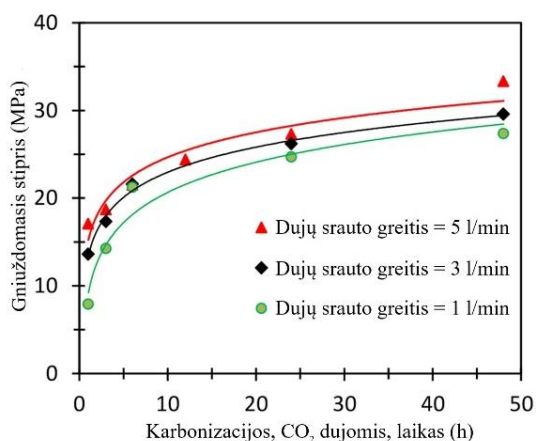
Xuan ir kt. [26] atliktame tyrime buvo naudotas tėkmės karbonizacijos metodas, kurio metu buvo užtikrinamas pastovus aplinkos slėgis, pastovus 100 % koncentracijos CO₂ dujų srautas (5 l/min). Suformuoti bandiniai nedelsiant patalpinti į CO₂ kietinimo kamerą. Bandymų metu nustatyta, kad betono gniuždomasis stipris buvo didžiausias, kai santykinė oro drėgmė (RH) CO₂ kameroje yra ~49,7 %, o kai RH ~99,7 % - stipris labai sumažėjo, nes CO₂ ir cemento komponentų cheminės

reakcijos prasideda CO₂ dujoms ištirpus vandenyje, tačiau jei vandens yra per daug jis stabdo CO₂ difuziją ir mažina reakcijos greitį. 13 paveiksle pavaizduota santykinės drėgmės įtaka karbonizuotų bandinių gniuždomajam stipriui.



13 pav. Santykinės drėgmės įtaka karbonizacijai [26]

1.7.2. Dujų srauto greitis

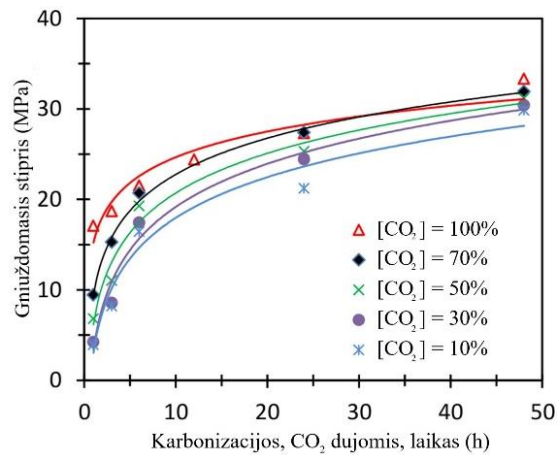


14 pav. Dujų srauto greičio įtaka karbonizacijai [26]

Xuan ir kt. [26] atliktame tyrime bandiniai buvo karbonizuojami esant pastoviai 49,7 % santykinėi drėgmei ir pastoviai 100 % CO₂ koncentracijai. Pastebėta, kad didinant dujų srauto greitį didėjo ir karbonizuotų betono blokų gniuždomasis stipris. Kadangi bandiniai nebuvo džiovinami prieš juos patalpinant į CO₂ kamerą, jie turėjo didelį laisvo vandens kiekį. Dujų srauto greičio didinimas buvo naudingas laisvam vandeniui pašalinti ir sumažinti jo kiekį bandiniuose. Dujų srauto greičio įtaka karbonizacijai pavaizduota 14 pav.

1.7.3. Dujų koncentracija

Xuan ir kt. [26] atliktame tyrime bandiniai buvo karbonizuojami esant pastoviam 5 l/min CO₂ dujų srautui ir pastoviam 49,7 % RH. Pastebima, kad didesnė CO₂ dujų koncentracija lėmė didesnį stiprumo vystymąsi, ypač pirmąsias valandas. Po 48 val. stiprumas skirtumas tapo nereikšmingas, tai reiškia, kad norint pasiekti didžiausią gniuždomąjį stiprį nebūtina naudoti didžiausią anglies dioksido dujų koncentraciją. CO₂ dujų koncentracijos įtaka karbonizacijai pavaizduota 15 pav.



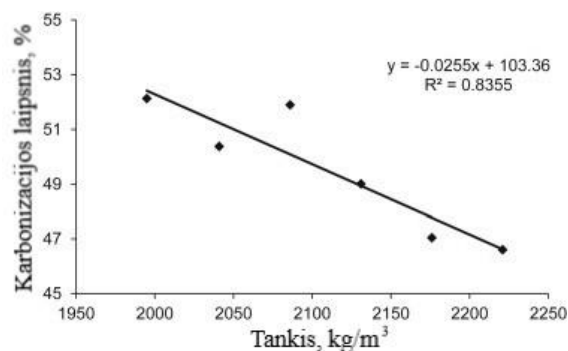
15 pav. CO₂ dujų koncentracijos įtaka karbonizacijai [26]

1.7.4. Temperatūra

Lu B. ir kt. [35] ištyrė temperatūros (5-50 °C) poveikį karbonizacijos procesui, gniuždomajam stipriui ir CO₂ dujomis kietinto cemento mišinio mikrostruktūrai. Tyrimo rezultatai parodė, kad temperatūra ir karbonizacijos laikas turėjo didelės įtakos karbonizacijos procesui ir greičiui. Padidinus temperatūrą padidėjo ir betono gniuždomasis stipris. Temperatūra turėjo įtakos CaCO₃ polimorfų morfologijai ir augimui. Kalcitas buvo dominuojanti polimorfinė forma, rasta visuose bandiniuose nepriklausomai nuo karbonizacijos laiko ar temperatūros. Valeritas formavosi žemoje temperatūroje, o aragonitas – aukštoje temperatūroje.

1.7.5. Tankis




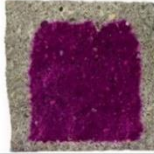



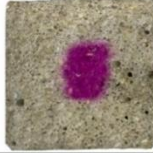




Zhan ir kt. [36] atliko tyrimą, kurio metu buvo nagrinėjamos medžiagų savybės bei CO₂ dujomis kietinamų bandinių karbonizacijos efektyvumo priklausomybė nuo tankio. Rezultatai parodė, kad karbonizacijos efektyvumas sumažėjo nuo 52,1 % iki 46,6 %, kai betono blokelių tankis padidėjo nuo 1995 iki 2222 kg/m³. Taip yra todėl, nes didinant tankį mažėja porų kiekis t.y. mažėja pralaidumas ir CO₂ dujoms sunkiau prasiskverbti bei karbonizuoti betono mišinio elementus.



16 pav. Karbonizacijos efektyvumo priklausomybė nuo tankio [36]

1.7.6. Betono sudėtis ir V/C santykis

Kietinant gaminius CO₂ dujomis svarbu žinoti, kaip pakinta karbonizacijos laipsnis keičiant betono sudėtį arba vandens ir cemento santykį. Karbonizacijos laipsniui ir gyliui nustatyti naudojamas fenolfaleinas [37].

	3 paros	7 paros	28 paros
BRC-C			
Karbonizacijos laipsnis	14.6%	57.4%	100%
OQ-C			
Karbonizacijos laipsnis	44.4%	74.6%	100%
BQ-C			
Karbonizacijos laipsnis	32.4%	89.7%	100%
BL-C			
Karbonizacijos laipsnis	18.9%	78.8%	100%

17 pav. Skirtingos sudėties betono gaminių karbonizacijos laipsnis [38]

Lin ir kt. [37] atliktas tyrimas parodė, kvarco ir kalkių poveikį, skirtingų sudėčių betono gaminių karbonizacijos procesui. Bandymui buvo naudotos 4 skirtingų betono sudėčių gaminiai, kurių rišikliai: a) 100 % cemento gausaus belito mineralais (BRC), b) 20 % kvarco + 80 % portland cemento (OQ), c) 80 % cemento gausaus belito mineralais + 20 % kvarco (BQ), d) 80 % cemento gausaus belito mineralais + 20 % kalkių (BL). 17 pav. pavaizduotas karbonizacijos laipsnis nustatytas pagal karbonizuoto ploto ir viso ploto santykį po 3, 7 ir 28 parų. BQ ir BL sudėties betono karbonizacijos efektyvumas, po 3 ir 7 parų, buvo didesnis nei BRC, tai parodo, kad į betoną įdėjus priemaišų (kvarco ar kalkių) jis karbonizuoja lengviau.

Panašus tyrimas buvo atliktas siekiant ištirti V/C santykio įtaką karbonizacijos laipsniui [38]. Bandyme naudotos 2 betono mišinio sudėties, kurių rišikliai: a) cementas gausus belito mineralais (BRC), b) portland cementas (OPC). Didesnis karbonizacijos laipsnis buvo bandiniuose, kurių vandens ir cemento santykis buvo didesnis, nes didesnis V/C sudaro poringesnį betoną ir padidina pralaidumą CO₂ dujoms leidžiančioms reaguoti su betono mišinyje esančiais mineralais. Lyginant karbonizacijos laipsnio priklausomybę nuo sudėties – BRC betono gaminiuose karbonizacija pradėjo vykti lėčiau, tačiau pilnai karbonizacija įvyko greičiau.

V/C		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
3 paros	OPC					
	Karbonizacijos laipsnis (%)	0	23	40	48	52
	BRC					
	Karbonizacijos laipsnis (%)	7	19	24	15	10
7 paros	OPC					
	Karbonizacijos laipsnis (%)	17	42	47	74	100
	BRC					
	Karbonizacijos laipsnis (%)	24	57	86	92	99
28 paros	OPC					
	Karbonizacijos laipsnis (%)	40	59	64	100	100
	BRC					
	Karbonizacijos laipsnis (%)	59	93	100	100	100

18 pav. Karbonizacijos laipsnio priklausomybė nuo V/C santykio [38]

1.7.7. Dalelių dydis

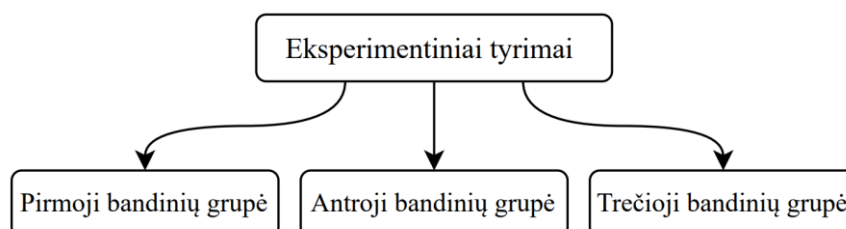
Smulkesnės cementinių medžiagų dalelės paprastai didina karbonizacijos efektyvumą, nes dalelių ir CO₂ dujų sąlyčio plotas tampa didesnis. Liu ir kt. [39] atliko perdirbto užpildo karbonizacijos tyrimą, kurio metu pastebėta, kad 5-10 mm dydžio dalelės sugeria 52 % daugiau CO₂ nei užpildas, kurio dalelių dydis 10-14 mm. Tiriant betono bandinius nustatyta, kad bandinys su smulkesnių dalelių cementu sugeria daugiau CO₂ dujų nei bandinys su stambesnių dalelių cementu. Taip pat nustatyta kad ir kitų rišamųjų medžiagų dalelių dydis turi įtakos karbonizacijos efektyvumui.

1.8. Panaudojimas

CO₂ dujomis karbonizuojami surenkami betono gaminiai: betono mūro blokai, betoninės grindinio trinkelės, betoniniai vamzdžiai, armuotos betoninės sijos, cementu surištos medžio drožlių plokštės ir kt. Karbonizuoti gaminiai pasižymėjo panašiomis fizikinėmis, mechaninėmis ir ilgaamžiškumo savybėmis kaip ir garais ar drėgnuoju būdu kietinti analogiški gaminiai, tačiau jų atsparumas šildymo-šaldymo ciklams ir sulfatų poveikiui buvo didesnis. Jei ši technologija būtų pritaikyta pasauliniu mastu, betoniniuose gaminiuose būtų galima sukaupti iki 934 mln. tonų CO₂ dujų ir tai leistų 22 % sumažinti, su cemento gamyba susijusio, išmetamo anglies dioksido kiekį [40]

2. Tyrimų metodologija

Tyrimai buvo atliekami išskirstant juos į 3 grupes: pirmoji grupė – bandymai pritaikant skirtingas presavimo technikas, siekiant nustatyti bandinių savybių kitimo tendencijas ir kietinimo CO₂ kameroje įtaką savybėms; antroji grupė – komercinės/gamyklinės paskirties gaminių (trinkelių) fizinių ir mechaninių savybių pokyčiai juos kietinant CO₂ aplinkoje; trečioji grupė – plonasluoksnių gaminių savybių nustatymas. 1-ai ir 3-iai grupėms naudojami 2 skirtingi rišiklių tipai – kalkės bei cementas.



2.1. Standartų sąrašas

Baigiamajame magistro projekte naudoti standartai:

- LST EN 206:2013+A2:2021. Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis [41];
- LST EN 197-1:2011. Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai [42];
- LST EN 459-1:2015. Statybinės kalkės. 1 dalis. Apibrėžtys, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai [43];
- LST EN 12390-1:2021. Sukietėjusio betono bandymai. 1 dalis. Pavidalas, matmenys ir kiti bandinių bei liejimo formų reikalavimai [44];
- LST EN 12390-3:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris [45];
- LST EN 12390-5:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris [46];
- LST EN 12390-6:2009. Betono bandymas. 6 dalis. Bandinių tempimo stipris skeliant [47];
- LST EN 12390-7:2009. Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis [48];
- LST EN ISO 10545-3:2018. Keraminės plytelės. Vandens įmirkio, tariamojo poringumo, tariamojo santykinio tankio ir tankio nustatymas [49];
- LST EN 14411. Keraminės plytelės. Apibrėžtys, klasifikavimas, charakteristikos, eksploatacinių savybių pastovumo vertinimas ir tikrinimas bei ženklavimas [50];
- LST EN 1338/P. Betoninės grindinio trinkelės. Reikalavimai ir bandymo metodai [51];
- LST EN 13892-3:2015. Grindų išlyginamųjų medžiagų bandymo metodai. 3 dalis. Atsparumo dėvėjimuisi nustatymas Böhme metodu [52].

2.2. Naudotos medžiagos

Šiame skyriuje pateikiamos baigiamajame magistro projekto tyrimų metu naudotos medžiagos.



19 pav. Kvarcinis smėlis 0,0-0,4 mm frakcijos [53, 54]



20 pav. Portlandcementis CEM I 42,5 N [55, 56]



21 pav. Gesintos kalkės [57, 58]

2.2.1. Kvarcinis smėlis

Dėl pasirinktos bandinių gamybos presavimo technologijos, betono užpildas turi būti smulkiagrūdis ir tam pasirinkta naudoti kvarcinį smėlį. Bandiniams gaminti naudojamas „Anykščių kvarcas“ džiovintas kvarcinis smėlio užpildas su 2/0,05 0,0-0,4 mm frakcija, kurio pagrindinę dalį sudaro 0,1-0,315 mm dydžio kvarcinio smėlio dalelės (žr. 19 pav.) [54].

2.2.2. Cementas

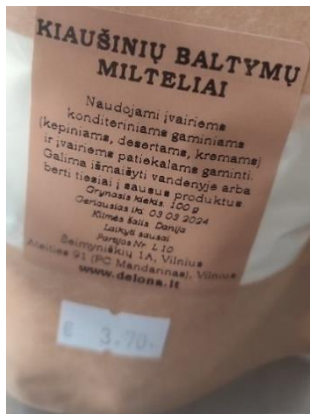
Pirmasis naudotas bandinių mišinių rišiklis – cementas. Pasirinktas cementas yra „Akmenės cementas“ portland-cementis CEM I 42,5 N EXTRA. Šis cementas naudojamas statybinių medžiagų gamyboje kaip hidraulinė rišamoji medžiaga tinkavimo, mūrijimo skiediniams ir įvairiems betonams bei betono gaminiams gaminti (žr. 20 pav.) [56]. Pasirinktas cementas yra įprastinio ankstyvojo stiprio – rišimosi pradžia yra anksčiau nei 60 min, bei atitinka LST EN 197-1:2011 standarte pateiktus reikalavimus [42].

2.2.3. Kalkės

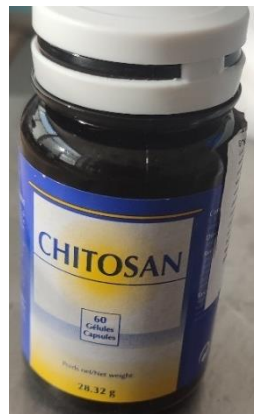
Antrasis naudotas rišiklis – gesintos kalkės, atitinkančios LST EN 459-1:2015 standartuose keliamus reikalavimus [43]. Pasirinktos kalkės yra „Lhoist NATURA“, kurių tipas yra CL 90 – S. Šios kalkės naudojamos skiedinių rišiklių paruošimui ir kitų statybinių gaminių gamybai (žr. 21 pav.). Skaičius 90 nurodo, kad $\geq 90\%$ sudėties sudaro kalcio ir magnio oksidai, raidės CL nurodo, kad tai kalcitinės kalkės, o raidė S – kalkės miltelių pavidale [58].

2.2.4. Papildomi priedai

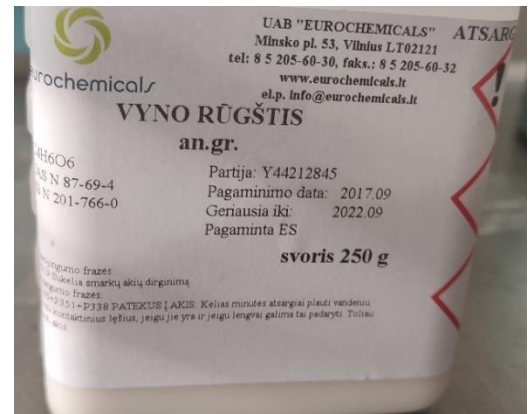
Siekiant ieškoti naujų inovatyvių sprendimų pagerinti betoninių gaminių savybes, buvo išbandyti ir neįprasti priedai, betono mišinio sudėčiai pagerinti.



22 pav. Kiaušinių baltymų milteliai



23 pav. Maisto papildas - chitosan



24 pav. Vyno rūgštis

Kiaušinių baltymų milteliai

Pirmasis priedas yra kiaušinių baltymų milteliai, kurie naudoti įprastam kiaušinio baltymui pakeisti, kuris manoma, kad turi geras surišimo savybes ir gali tvirčiau surišti betono mišinį bei pagerinti bandinių mechanines stiprumo savybes.

Chitosan – maisto papildas

Šis priedas yra biopolimeras, pagamintas iš chitino, randamo vėžiagyvių kiaučiuose. Chitinas yra organinė medžiaga, kurią sudaro tik labai maža mineralinė dalis. Manoma, kad chitosan gali pagerinti betono ilgaamžiškumą, mechanines savybes, padidinti atsparumą vandeniui, drėgmei, kai kuriems agresyviems chemikalams, taip pat pagerinti priešgrybelines ir antibakterines savybes.

Vyno rūgštis

Vyno rūgštis, betono gamyboje gali būti naudojama, siekiant sulėtinti betono kietėjimo procesą ar pagerinti fizines-mechanines savybes.

2.3. Hidrauliniu presu ir giratoriumi formuotų gaminių tyrimai

2.3.1. Bandinių sudėtis

Šios grupės bandiniai buvo gaminami 2 skirtingų sudėčių. Bandinių gamybos technologija – presavimas, dėl šios technologijos reikalavimų, vandens kiekis sudaro tik 8 % visos mišinio masės. 1-osios sudėties betono mišiniui pagaminti naudotas cemento rišiklis, kurio kiekis yra 30 % visos mišinio masės, o likusi mišinio dalis buvo 0/4 frakcijos kvarcinis smėlis. 2-osios sudėties betonui pagaminti pakeičiamas tik rišiklio tipas – gesintos kalkės.

1 lentelė. Bandinių sudėtys 1 m³ betono pagaminti

Sudėties Nr.	Žymėjimas	Rišiklio tipas	Rišiklio kiekis, kg	Užpildo tipas	Užpildo kiekis, kg	Vanduo, %	Vanduo, l
1	C	Cementas	667	Kvarcinis smėlis 0/4	1459	8 %	142
2	K	Gesintos kalkės	476	Kvarcinis Smėlis 0/4	1041	8 %	102

2.3.2. Bandinių formavimas

Bandinių gamybai naudota presavimo technologija, todėl dėl turimos įrangos kiekvienas bandinys buvo gaminamas individualiai. Maišant bandinių mišinius tikrinama ar sudėtis tinkama presavimui – mišinį suspaudus delne jis turi likti standus, o dūrus pirštu į suspaustą standų mišinį jis, turi skilti į gabalėlius (žr. 28 pav.). 1-osios sudėties bandiniai buvo presuojami naudojantis presu bei giratoriumi, o 2-osios sudėties – tik giratoriumi.



25 pav. Mišinių maišyklė „Automix 65-L0006A“, tūris - 3l



26 pav. Sumaišytas mišinys



27 pav. Delne suspaustas mišinys (standus)



28 pav. Suspausto standaus suirimas į jį dūrus pirštu

Atliekant presavimą presu mišinys presavimo formoje buvo tolygiai gniuždomas (0,2 kN/s greičiu) iki 5 MPa ribos, pasiekus šią reikšmę apkrovimo greitis didėjo iki 1 kN/s ir bandiniai buvo presuojami iki 200 MPa ribos, tuomet atsargiai pašalinti iš įrenginio bei formos. Atliekant presavimą giratoriumi, bandiniai presuojami pneumatinio veikimo principu, bandiniui besisukant. Bandiniai buvo slegiami 100 ciklų vertikalios krypties apkrova, po jų bandiniai buvo atsargiai pašalinami iš įrenginio, formos.



29 pav. Bandymo mašina – hidraulinis presas



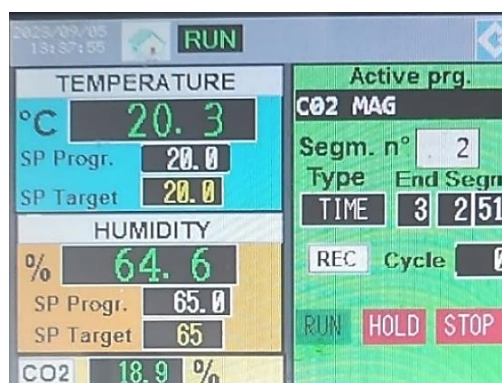
30 pav. Giratorius "Controls"



31 pav. Specialus giratoriaus presavimo indas

2.3.3. Kietinimo sąlygos

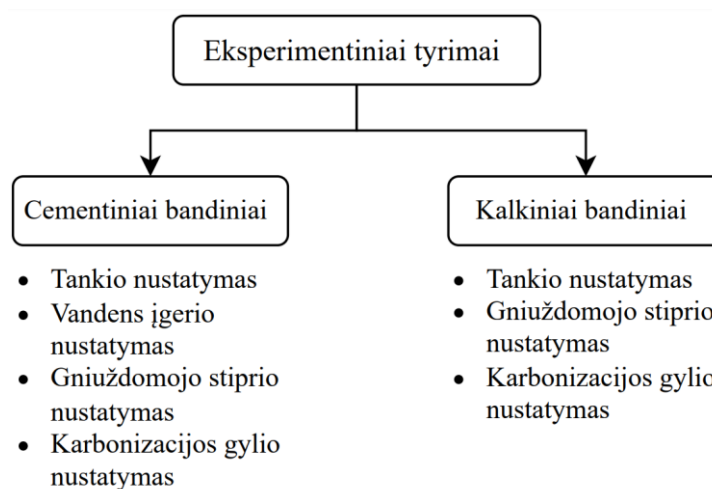
Bandiniai kietinti CO₂ dujų kameroje bei ore. Dalis kalkinių ir cementinių bandinių po 13 parų kietinimo ore patalpinami į CO₂ dujų kamerą ir kameroje laikyti 3 paras užtikrinant pastovias aplinkos sąlygas: CO₂ dujų koncentracija – 19 %; drėgmė – 65 %; oro temperatūra – 20 °C. Bandiniai pašalinti iš CO₂ kameros 12 parų toliau buvo kietinti ore. Likę bandiniai 28 paras kietinti ore. Ore laikytų bandinių klimatinės sąlygos: temperatūra - 20±5 °C; santykinė drėgmė 55±5 %.



32 pav. CO₂ dujų kameros klimatinės sąlygos

2.3.4. Eksperimentiniai tyrimai

Po 28 parų kietinimo, pradėti bandinių eksperimentiniai tyrimai:



Tankio nustatymas

Slankmačiu išmatuoti bandinių išoriniai matmenys – aukštis bei skersmuo pagal LST EN 12390-1 [44]. Apskaičiuotas bandinių tūris, bandiniai pasverti. Tankio skaičiavimui naudota bandinių masė gauta po bandinių džiovinimo. Bandinių tankis apskaičiuotas pagal LST EN 12390-7:2009 standarte pateiktą formulę (2.1) [48]:

$$D = \frac{m}{V}, \quad (2.1)$$

čia:

D – tankis, kg/m³;

m – bandinio masė bandymo metu, kg;

V – konkrečiu metodu nustatytas tūris, m³.

Vandens įgėris nustatymas

Po pirmųjų matavimų bei svėrimo bandiniai panardinti į indą su vandeniu. Po 3 parų bandiniai ištraukti iš vandens bei pakartotinai pasverti ir patalpinti į džiovinimo kamerą, kurioje buvo džiovinti 9 paras 105°C temperatūroje, kad pasišalintų perteklinis vanduo esantis bandiniuose. Praėjus šiam laikotarpiui, bandiniai išimami iš džiovyklės bei pasveriami pakartotinai (pastaba - šie bandymai atlikti tik su cementiniais bandiniais). Vandens įgėris apskaičiuojamas pagal (2.2) formulę:

$$W = \frac{w_1 - w_2}{w_2} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

čia:

W – bandinio įgėris, %;

w₁ – įmirkusio bandinio masė ore, prieš džiovinimą, g;

w₂ – bandinio masė ore, po džiovinimo, g.



33 pav. Džiovinimo krosnis/kamera



34 pav. Fenolftaleino tirpalas - pH indikatorius

Gniuždomojo stiprio nustatymas

Viena svarbiausių betoninių gaminių savybių – gniuždomasis stipris, siekiant sužinoti, kokią įtaką betono stiprumui turėjo kietinimas CO₂ dujose, buvo atliekamas gniuždomojo stiprio nustatymas. Išdžiūvę bandiniai gniuždyti presu, apkraunant pastoviu 0,2 MPa/s greičiu iki bandinio suirimo. Gniuždymas atliktas pagal LST EN 12390-3:2019 standarte aprašytą metodiką [45]. Gniuždomasis stipris apskaičiuotas pagal formulę (2.3):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.3)$$

čia

f_c – gniuždymo stipris, MPa (N/mm²);

F – didžiausioji ardomoji apkrova, N;

A_c – bandinio, kurį veikia gniuždymo jėga, skerspjūvio plotas, apskaičiuotas pagal nurodytą bandinio dydį, mm².

Karbonizacijos gylio nustatymas

Karbonizacijos gylis bandiniuose nustatytas juos sugniuždžius ir perskėlus, bandinio paviršius apipurškiamas pH indikatoriumi t.y. fenolftaleino tirpalu (žr. 34 pav.). Fenolftaleino tirpalas leidžia nustatyti ar medžiagos terpė rūgštine, neutrali ar šarminė. Ant bandinių užpurkštas indikatorius reaguoja su betone esančiomis kalcio hidroksido (Ca(OH)₂) dalelėmis, bandinyje pilnai karbonizacijai neįvykus jis nusidažys ryškia rožine spalva. Laikoma, kad pilna karbonizacija įvyko tuose bandinio plotuose, kurie spalvos visiškai nepakeitė.

2.4. Gamykloje formuotų grindinio trinkelėlių eksperimentiniai tyrimai

2.4.1. Bandinių sudėtis ir gamyba

Šiai grupei buvo naudojami komerciniai gamykliniai bandiniai – šviežiai pagamintos grindinio trinkelės, kurios buvo užsakytos iš vienos iš Kaune įsikūrusių betono ir gelžbetonio gaminius gaminančių įmonių, tad tiksli šių bandinių sudėtis nėra žinoma. Trinkelės pagamintos liejimo arba presavimo metodu naudojant specialias formas, užtikrinant tolygų betono mišinio pasiskirstymą ir susitankinimą. Trinkelėlių matmenys: 200×100×60 mm.

2.4.2. Kietinimo sąlygos

Bandiniai kietinti CO₂ dujų kameroje bei ore. Bandiniai išskirti į 3 grupes: 1-oji grupė – bandiniai 28 paras kietinti tik ore; 2-oji grupė – bandiniai po 17 parų kietinimo ore, sudrėkinti ir 3 paroms patalpinti į CO₂ kamerą ir toliau 8 paras kietinti ore; 3-ioji grupė – bandiniai po 17 parų kietinimo ore, patalpinami į CO₂ kamerą 3 paroms (sausai), po kurių 8 paras kietinami ore. CO₂ dujų kameroje buvo užtikrinamos pastovios aplinkos sąlygos: CO₂ dujų koncentracija – 19 %; drėgmė – 65 %; oro temperatūra – 20 °C. Ore laikytų bandinių klimatinės sąlygos: temperatūra – 20±5 °C; santykinė drėgmė 55±5 %.

2.4.3. Eksperimentiniai tyrimai

Po 28 parų kietinimo, pradedami bandinių eksperimentiniai tyrimai:

- Vandens įgėrio nustatymai
- Skeliamojo stiprio nustatymas
- Karbonizacijos gylio nustatymas
- Dilumo nustatymas
- Atsparumo šalčiui nustatymas
- Cheminės sudėties tyrimas
- pH lygio nustatymas

Vandens įgėrio nustatymas

Prieš vandens įgėrio nustatymo bandymus bandiniai išdžiovinti džiovinimo krosnyje 105±5 °C temperatūroje. Vandens įgėrio nustatymui buvo naudojamas vakuumo metodas, kurio metu bandiniai yra uždaromi į specialų vakuuminį indą (žr. 35 pav.) 30-čiai minučių, tada apsemiami vandeniu ir laikomi vakuume 15 minučių vandenyje, po kurių bandiniai atsargiai išimami bei pasveriami ant svarstyklių bei vandenyje. Trinkelėlių vandens įgėrio nustatymui bei apskaičiavimui taikomi LST EN ISO 10545-3:2018 standarte aprašyti reikalavimai bei formulės skirti klinkerinėms plytelėms [49].



35 pav. Vakuomo prietaisas

Vandens įgėriui apskaičiuoti naudojama (2.4) formulė:

$$E_v = 100 \times \frac{(m_2 - m_1)}{m_1}; \quad (2.4)$$

Išorinis tūris apskaičiuotas pagal (2.5) formulę:

$$V = m_2 - m_3; \quad (2.5)$$

Porų tūris apskaičiuotas pagal (2.6) formulę:

$$V_0 = m_2 - m_1; \quad (2.6)$$

Nepralaidžios dalies tūris apskaičiuotas pagal (2.7) formulę:

$$V_1 = m_1 - m_3; \quad (2.7)$$

Poringumas apskaičiuotas pagal (2.8) formulę:

$$P = 100 \times \frac{(m_2 - m_1)}{V}; \quad (2.8)$$

Tariamasis santykinis tankis apskaičiuotas pagal (2.9) formulę:

$$T = \frac{m_1}{m_1 - m_3}; \quad (2.9)$$

Tūrinis tankis apskaičiuotas pagal (2.10) formulę:

$$B = \frac{m_1}{V}, \quad (2.10)$$

čia

E_v – vandens įgėris, %;

m_1 – sausos trinkelės masė (prieš vakuumą), g;

m_2 – šlapios trinkelės masė ore (po laikymo vakuume), g;

m_3 – šlapios trinkelės masė vandenyje (po laikymo vakuume), g;

V – išorinis tūris, cm^3 ;

V_0 – porų tūris, cm^3 ;

V_1 – nepralaidžios dalies tūris, cm^3 ;

P – poringumas, %;

T – tariamasis santykinis tankis g/cm^3 ;

B – tūrinis tankis g/cm^3 .

Skeliamojo stiprio nustatymas

Skeliamasis stipris nustatytas naudojant presą ir specialią formą pagal LST EN 12390-6:2009 standarte aprašytą metodiką [47]. Bandymo metu bandiniai tolygiai apkrauti pastoviai didėjančia apkrova per tarpiklius iki bandinio suirimo. Tolimesni skaičiavimai atlikti naudojant didžiausią bandinio ardomąją apkrovą.

Tempimo stipris skėlimui apskaičiuotas pagal (2.11) formulę:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}, \quad (2.11)$$

čia

f_{ct} – tempimo stipris skėlimui, N/mm²;

F – didžiausia ardomoji jėga, N;

L – bandinio kontaktinės linijos ilgis, mm;

d – bandinio skerspjūvio matmuo, mm.



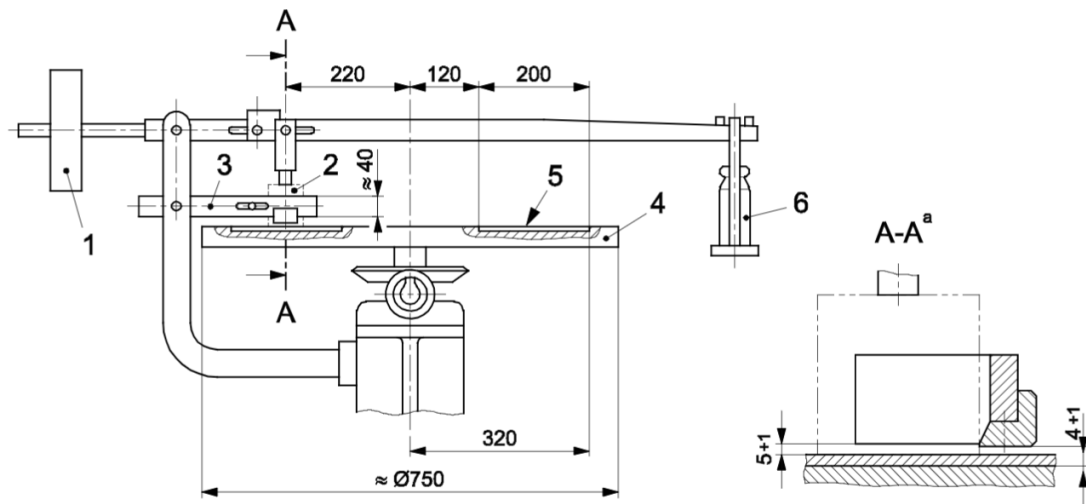
36 pav. Skėlimo bandymas naudojantis presu

Karbonizacijos gylio nustatymas

Karbonizacijos gylis bandiniuose nustatytas juos perskėlus, bandinio paviršius apipurkštas fenolftaleino tirpalu, kuris nusako medžiagos terpės tipą – rūgštinė, neutrali ar šarminė. Ant perskeltų bandinių užpurškiamas tirpalas reaguoja su betone esančiomis kalcio dalelėmis ir pagal tai pakeičia spalvą. Jei bandinys pilnai karbonizavosi, bandinys spalvos nepakeis, priešingu atveju bandinys nusidažys ryškia rožine spalva.

Dilumo nustatymas

Atsparumas dilumui parodo medžiagos ar gaminio gebėjimą priešintis dėvėjimui – trinties jėgoms. Dilumo bandymai buvo atliekami Böhme metodu pagal LST EN 1338:2003, LST EN 1338:2003/AC:2006, LST EN 1338:2003/P:2008, LST EN 13892-3:2015 standartų reikalavimus bei nurodymus [51, 52]. Bandymams naudoti iš trinkelėlių išpjauti 71×71×60 mm bandiniai, kurių dilumui nustatyti buvo naudojamas dirbtinis konduras (dilinimo medžiaga – aliuminio oksidas). Bandymui naudota įranga pavaizduota 37 paveikslėlyje.



37 pav. Böhme metodu naudojamos įrangos principinė schema: 1 - atsvara; 2 - bandinys; 3 - bandinio laikiklis; 4 – besisukantis diskas; 5 - bandymo takas; 6 - apkrovimo svarstis [52]

Atsparumas dilumui nusakomas tūrio nuostoliais, kurie apskaičiuojami pagal masės pokyčius. Norint apskaičiuoti tūrio nuostolius, reikia žinoti ir bandinio tankį ρ_R , todėl bandinys išmatuotas 0,1 mm ir pasveriamas 0,1 g tikslumu. Prieš dilinimą bandiniai išdžiovinami klimatinėje kameroje (105 ± 5) °C temperatūroje iki pastovios masės. Kiekvienas bandinys išbandomas 16 ciklų, kurie susideda iš 22 apsisukimų. 20 g dirbtinio konduro paskleista bandymo take (5), bandinys įstatytas į laikiklį (3), bandomasis paviršius nukreiptas į bandymo tako pusę ir centriškai apkrautas 294 ± 3 N apkrova. Besisukantis diskas pasukamas, kad dilinimo medžiaga pasiskirstytų tolygiai. Po kiekvieno ciklo bandinio kontaktinis paviršius ir sukamasis diskas yra nuvalomi, bandinys pasveriamas ir pasuktas 90° kampu įstatomas atgal į laikiklį. Bandymo trasa papildoma 20 g dilinimo medžiagos ir bandymai tęsiami toliau. Atsparumas dėvėjimuisi pagal Böhme A metodą po 16 ciklų apskaičiuotas pagal tūrio nuostolius (2.12) formule:

$$A = \Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_R}, \quad (2.12)$$

čia

$A = \Delta V$ – atsparumas dilumui, pagal Böhme metodą $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$ (tūrio praradimas po 16 ciklų);

Δm – masės nuostoliai po 16 ciklų, g;

ρ_R – bandinio tankis, g/cm^3 .

Atsparumo šalčiui nustatymas

Atsparumo šalčiui nustatyti naudotas amerikiečių šildymo-šaldymo ciklų metodas, kurio metu gaminiai, šiuo atveju trinkelės, buvo įmerkti į vandenį, apsemti 0,5 cm ir patalpinti į kamerą su šildymo-šaldymo ciklais. Trinkelės kameroje laikytos 20 parų. Po bandymo trinkelės ištrauktos ir atlikta vizualinė patikra.

Cheminės sudėties tyrimas

Siekiant nustatyti bandinių cheminėje sudėtyje likusį kalcio oksido kiekį bei buvusį kalcio hidroksido kiekį buvo atliekami cheminės sudėties tyrimai. Kiekvienos rūšies bandiniai buvo sutrinti į miltelius ir pasverta po 18 g miltelių. Indeliai su milteliais patalpinti į džiovinimo kamerą ir džiovinami

(105±5)°C temperatūroje iki pastovios masės. Po džiovinimo bandiniai pasverti ir toliau džiovinti (620±5)°C temperatūroje iki pastovios masės. Chemine lygtimi (2.13) apskaičiuota prarasta masė bei CaO ir Ca(OH)₂ kiekiai.



pH lygio nustatymas

Pasinaudojus trintais trinkelių bandiniais atliktas pH lygio nustatymas. Indas pripildomas 100 ml distiliuoto vandeniu bei sumaišomas su turimais trinkelių milteliais (1g). Naudojantis elektroniniu pH indikatoriumi nustatytas bandinių pH lygis bei įvertintas pH lygio pokytis priklausomai nuo to, kokiomis sąlygomis bandiniai buvo kietinami.



38 pav. pH lygio nustatymas

2.5. Presuotų plonasluoksnių bandinių eksperimentiniai tyrimai

2.5.1. Bandinių sudėtis

Šiai grupei priklausantys bandiniai buvo gaminami iš 3 skirtingų sudėčių, tačiau bandymai papildyti ir bandiniais su neįprastais priedais. Kadangi bandiniai buvo presuojami, vandens kiekis sudaro tik 10% visos mišinio masės. 3-iajai sudėčiai naudotas cemento rišiklis (10 % viso mišinio masės). 4-osios sudėties rišiklis – gesintos kalkės (10 % viso mišinio masės). 5-osios sudėties rišiklis – cementas (8,3% viso mišinio masės) maišytas su kalkėmis (3,6 % viso mišinio masės).

2 lentelė. Bandinių sudėtys 1 m³ betono pagaminti

Sudėtis Nr.	Žymėjimas	Rišklio tipas	Rišklio kiekis, kg	Užpildo tipas	Užpildo kiekis, kg	Vanduo, %	Vanduo, l
3	C	Cementas	198,5	Kvarcinis smėlis 0/4	1587,5	10 %	198,5
4	K	Kalkės	202,0	Kvarcinis smėlis 0/4	1616,5	10 %	202,0
5	CK	Cementas	168,0	Kvarcinis smėlis 0/4	1536,0	11,90 %	240,0
		Kalkės	72,0				
6	B1	Kalkės	176,0	Kvarcinis smėlis 0/4	1564,0	10 %	195,5
		Kiaušinio baltymo milteliai	19,5				
7	B2	Kalkės	172,0	Kvarcinis smėlis 0/4	1527,0	10 %	191,0
		Chitosan	19,0				
8	B3	Kalkės	177,5	Kvarcinis smėlis 0/4	1579,0	10 %	197,5
		Vyno rūgštis	20,0				

2.5.2. Bandinių formavimas

Bandinių gamybai naudota presavimo technologija ir dėl turimos įrangos kiekvienas bandinys buvo gaminamas individualiai. Maišant bandinių mišinius tikrinama ar sudėtis tinkama presavimui – mišinį suspaudus delne jis turi likti standus, o dūrus pirštu į standų mišinį jis turi skilti (28 pav.). Bandiniai gaminti presu naudojant specialią formą. Subėrus mišinį į formą, buvo uždėta viršutinė formos dalis ir pastatomas į presą gniuždyti. Presavimo forma gniuždyta tolygiai (15 kN/min greičiu) iki 15 MPa, pasiekus šią reikšmę apkrovimo greitis didėja iki 1 kN/s ir presuojama iki 300 MPa, tuomet forma atsargiai pašalinama nuo preso plokščių ir bandinys išimamas iš formos. Dalis bandinių tą pačią gaminimo dieną įdėti į CO₂ dujų kamerą, likę – kietėti ore.



39 pav. 3 bandinių grupės gamybos procesas



40 pav. Šviežiai iš presavimo formos išimti bandiniai

2.5.3. Kietinimo sąlygos

Dalis bandinių iškart po presavimo 2 paras buvo kietinami CO₂ dujų kameroje, likusi dalis – kietinami ore. CO₂ dujų kameroje buvo užtikrinamos pastovios aplinkos sąlygos: CO₂ dujų koncentracija – 19 %; drėgmė – 65 %; oro temperatūra – 20 °C. Ore laikytų bandinių klimatinės sąlygos: temperatūra – 20±5 °C; santykinė drėgmė 55±5 %.

2.5.4. Eksperimentiniai tyrimai

Po 28 parų kietinimo, pradedami bandinių eksperimentiniai tyrimai:

- Tankio nustatymas
- Vandens įgėrio nustatymas
- Lenkiamojo stiprio nustatymas
- Karbonizacijos gylio nustatymas

Tankio nustatymas

Slankmačiu išmatuoti bandinių išoriniai matmenys – aukštis bei skersmuo pagal LST EN 12390-1 [44]. Apskaičiuotas bandinių tūris, bandiniai pasverti. Tankio skaičiavimui naudota bandinių masė gauta po bandinių džiovavimo. Bandinių tankis apskaičiuotas pagal LST EN 12390-7:2009 standarte pateiktą formulę (2.14) [48]:

$$D = \frac{m}{V}, \quad (2.14)$$

čia:

D – tankis, kg/m³;

m – bandinio masė bandymo metu, kg;

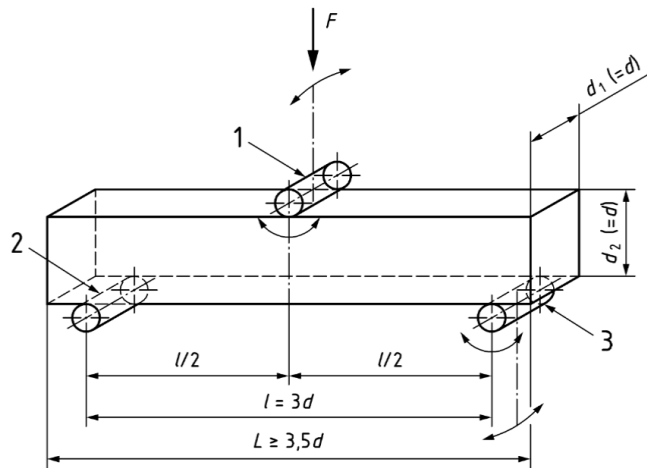
V – konkrečiu metodu nustatytas tūris, m³.

Vandens įgėrio nustatymas

Prieš vandens įgėrio nustatymo bandymus bandiniai išdžiovinami džiovavimo krosnyje 105 °C temperatūroje. matavimų bei svėrimo bandiniai panardinti į indą su vandeniu. Po 3 parų bandiniai ištraukti iš vandens bei pakartotinai pasverti ore bei vandenyje. Vandens įgėrio kinetikos skaičiavimai atliekami naudojantis (2.4-2.10) formulėmis.

Lenkiamojo stiprio nustatymas

Lenkiamasis bandinių stipris nustatytas pagal LST EN 12390-5:2019 standarte pateiktus nurodymus ir reikalavimus [46]. Bandymams naudojama centrinio taško apkrova, todėl naudojamas standarte pateiktas A priedas.



41 pav. Bandinio apkrovimo schema (centrinio taško apkrovimas): 1 - apkrovimo ritinys; 2,3 – atrėmimo ritinys [46]

Bandinių sulenkus ir suardžius buvo gauta didžiausia ardomoji bandinio apkrova. Lenkimo stipris apskaičiuotas pagal (2.15) formulę:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times d_1 \times d_2^2}, \quad (2.15)$$

čia:

$f_{ct,fl}$ – lenkimo stipris, MPa;

F – didžiausia ardomoji bandinio apkrova, N;

l – atstumas tarp apatinių ritinių, mm;

d_1 ir d_2 – skerspjūvio šoniniai matmenys, mm.

Karbonizacijos gylis nustatymas

Karbonizacijos gylis bandiniuose nustatytas juos sugniuždžius ir perskėlus, bandinio paviršius apipurškiamas pH indikatoriumi t.y. fenolftaleino tirpalu. Fenolftaleino tirpalas leidžia nustatyti ar medžiagos terpė rūgštine, neutrali ar šarminė. Ant bandinių užpurkštas indikatorius reaguoja su betone esančiomis kalcio hidroksido ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dalelėmis, bandinyje pilnai karbonizacijai neįvykus jis nusidažys ryškia rožine spalva. Laikoma, kad pilna karbonizacija įvyko tuose bandinio plotuose, kurie spalvos visiškai nepakeitė.

2.6. Bandinių utilizuoto CO_2 dujų kiekio apskaičiavimas

Utilizuotų CO_2 dujų kiekis apskaičiuojamas pagal tankio pokytį tarp CO_2 kameroje ir ore kietintų bandinių. Teoriškai, karbonizuotų bandinių masė didėja, nes kalcio hidroksidas ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reaguodamas su anglies dioksidu sudaro karbonatus, kurių masė yra didesnė nei kalkių. Cheminė reakcija pateikta 2.16 formulėje. Pirmiausia apskaičiuojamas tankio prieaugis, kuriuo pasinaudojant apskaičiuojamas kalkių kiekis prieš karbonizaciją ir tada pagal proporciją – utilizuotų dujų kiekis.



Plonasluoksnių bandinių (iki 1,3 cm aukščio), su kalkiniu rišikliu, utilizuotų CO_2 dujų kiekis apskaičiuojamas pagal žinomą kalkių kiekį sudėtyje, naudojantis ta pačia chemine reakcija (žr. 2.16 formulę). Tačiau tokie patys bandiniai, su cementiniu rišikliu, skaičiuojami naudojantis tankio pokyčiu. Šie skaičiavimai yra tik teoriniai, tai nėra tiesioginiai matavimai, todėl gali būti reikšmingų paklaidų, kadangi matavimams naudoti individualiai gaminti bandiniai.

3. Tyrimų rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami tyrimų rezultatai bei jų analizė, gauti atliekant magistro baigiamojo projekto laboratorinius bandymus.

3.1. 1 bandymų grupė - hidrauliniu presu ir giratoriumi formuotų gaminių tyrimų rezultatai

3.1.1. Tankio nustatymas

Tankis nustatytas pagal praeitame skyriuje aprašytą metodiką. Bandinių tankis apskaičiuotas bandiniams kietintiems ore ir CO₂ dujų aplinkoje, praėjus > 28 paroms nuo jų pagaminimo. Tankio reikšmės apskaičiuotos pagal (2.1) formulę, pateiktos 3 lentelėje.

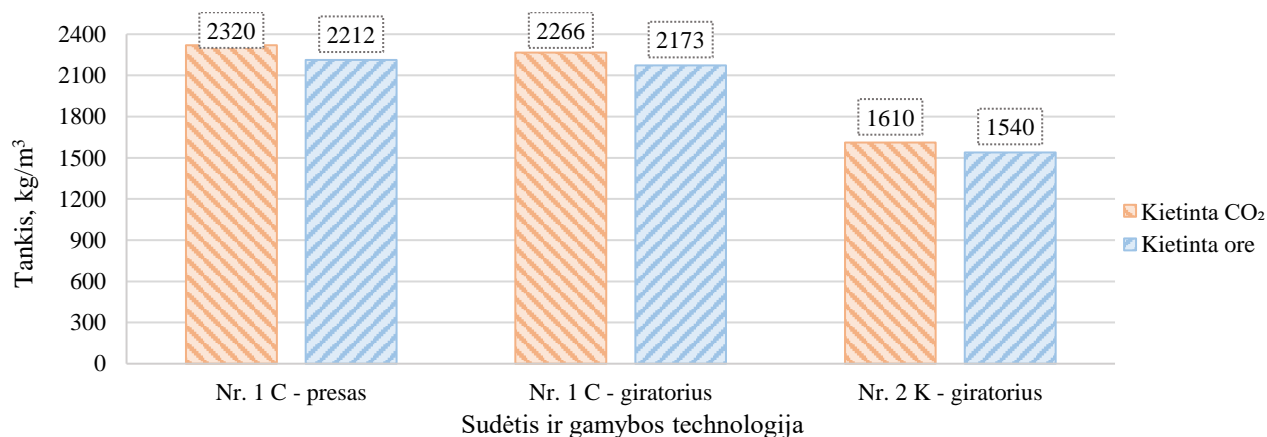
3 lentelė. Cementinių ir kalkinių gaminių tankis po >28 parų

Gamybos technologija	Sudėtis ir sudėties žymuo	Kietėjimo sąlygos	H, mm	Ø, mm	Svoris, g	Tankis, kg/m ³
Presas	Nr. 1 – C	CO ₂ + oras	79,99	103,18	1550,9	2320,00
		Oras	77,62	104,525	1470,65	2211,98
Giratorius	Nr. 1 – C	CO ₂ + oras	86,21	100,22	1540,2	2265,90
		Oras	86,76	100,11	1482,9	2172,84
	Nr. 2 – K	CO ₂ + oras	119,68	100,17	1517,6	1609,84
		Oras	120,46	100,21	1461,9	1539,51

Rezultatai parodo, kad kietinimas CO₂ dujų aplinkoje turi įtakos tankio dydžiui – cilindriniai bandiniai kietinti CO₂ aplinkoje buvo didesnio tankio nei kietinti ore, nepriklausomai nuo jų sudėties ar presavimo metodo.

Cementinių bandinių, presuotų presu ir kietintų CO₂ aplinkoje, tankis buvo didesnis 4,9 % lyginant su kietintais ore; giratoriumi presuotų ir CO₂ aplinkoje kietintų gaminių, su cementiniu rišikliu, tankis buvo 4,3 % didesnis nei kietintų ore, o kalkinių bandinių – 4,6 %. Tankio padidėjimą lėmė didesnė presavimo jėga bei didesnis kalcio karbonato susidarymas, tad galima teigti, kad bandinys geriau karbonizavosi CO₂ aplinkoje.

Lyginant tos pačios sudėties bandinių tankį, gautą bandinius gaminant skirtingomis presavimo technologijomis ir juos karbonizuojant, pastebima, jog presu presuoti bandiniai buvo 2,4 % tankesni už bandinius presuotus giratoriumi.



42 pav. Cementinių ir kalkinių bandinių tankis

Cementinių bandinių tankis svyruoja nuo 2150,6 iki 2320 kg/m³, nepriklausomai nuo jų gamybos technologijos. Pagal tankį, šis betonas priklauso normaliojo betono klasei ir jį galima naudoti konstrukcinėms medžiagoms gaminti. Kalkinių bandinių tankis svyruoja nuo 1539,5 iki 1620,8 kg/m³, šio tankio betoną priklauso lengvojo betono klasei ir jį galima naudoti kaip apkrovas perduodančią konstrukcinę medžiagą.

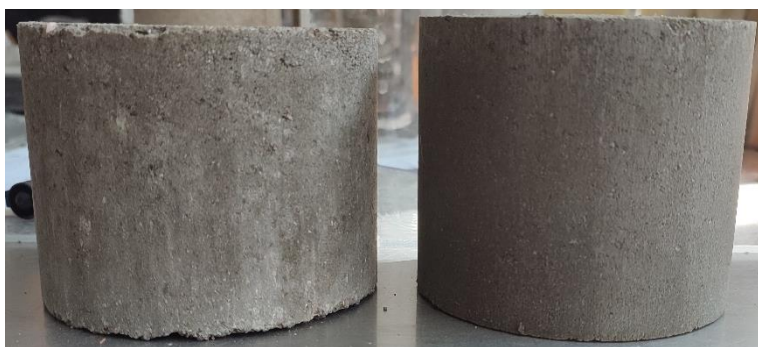
3.1.2. Vandens įgėrio nustatymas

Vandens įgėris buvo nustatomas tik cementiniams bandiniams, kurie 3 paras buvo panardinti vandenyje, pasverti ir 9 paras džiovinti džiovavimo krosnyje. Svorio matavimai atlikti bandinius ištraukus iš vandens bei išėmus iš džiovavimo kameros. Vandens įgėris apskaičiuotas pagal (2.2) formulę.

4 lentelė. Cementinių bandinių vandens įgėris

Gamybos technologija	Sudėtis ir sudėties žymuo	Kietėjimo sąlygos	Įmirkusio bandinio masė ore, prieš džiovinimą w_1 , g	Bandinio masė ore, po džiovinimo w_2 , g	Vandens įgėris, %
Presas	Nr. 1 – C	CO ₂ +oras	1590,0	1541,8	3,13
		Oras	1515,9	1462,4	3,66
Giratorius		CO ₂ +oras	1554,8	1505,3	3,29
		Oras	1536,2	1482,7	3,61

Pagal rezultatus matyti, kad cementinių bandinių gebėjimui įgerti vandenį, kietinimo būdas ir sąlygos turi labai minimalią įtaką, nepriklausomai nuo jų gaminimo technologijos. Bandinių kietintų CO₂ dujų aplinkoje vandens įgėris svyravo nuo 3,13 iki 3,29 %, o bandinių kietėjusių ore – nuo 3,61 iki 3,66 %. Karbonizuotų bandinių presuotų presu vandens įgėris buvo 14,5 % mažesnis nei kietintų ore, o pagamintų giratoriumi – 8,9 %.



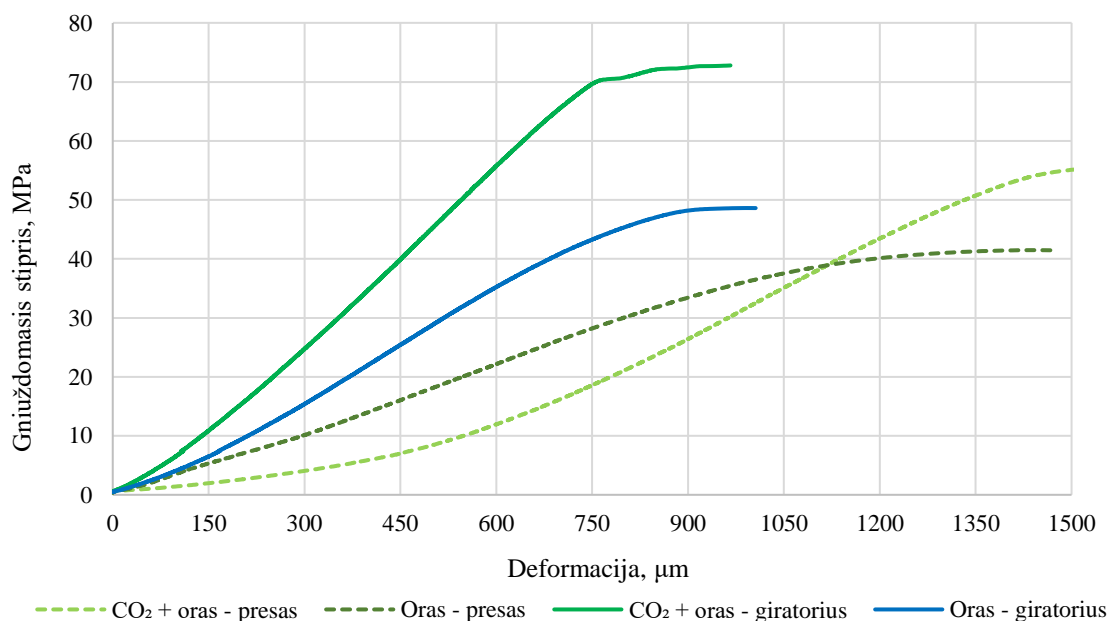
43 pav. Cementinių bandinių aukščio skirtumas: 1 – gamintas presu; 2 – gamintas giratoriumi

3.1.3. Gniuždomojo stiprio nustatymas

Gniuždomasis stipris buvo nustatymas po 28 parų nuo bandinių suformavimo. Pirmiausia buvo gniuždomi II ir VI bandiniai, kurių gniuždymo metu pastebėta, kad bandinių kietėjimo laikotarpiu gniuždomasis paviršiaus skerspjūvio plotas deformavosi (išsipūtė) ir juos gniuždant vyko skilimas, o ne tolygus suyrimas. Nuspręsta likusius bandinius šlifuoti, taip išlyginant bandinių paviršių ir paruošiant juos tolygiam gniuždymui. Gniuždomasis stipris apskaičiuotas pagal (2.3) formulę.

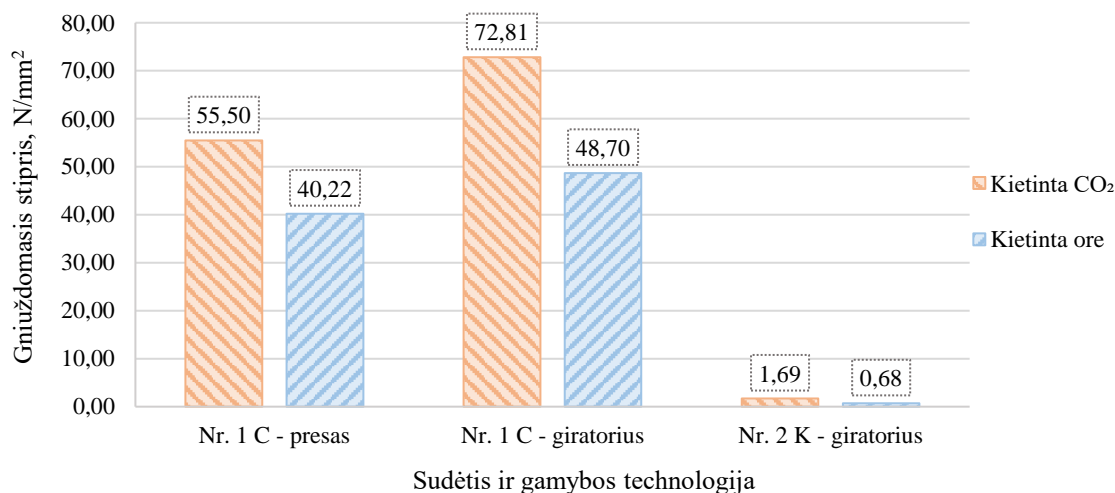
5 lentelė. Cementinių ir kalkinių gaminių gniuždomasis stipris

Gamybos technologija	Sudėtis ir sudėties žymuo	Kietėjimo sąlygos	Skerspjūvio plotas, A_c , mm ²	Didžiausia ardomoji apkrova, F, kN	Gniuždomasis stipris, f_c , N/mm ²
Presas	Nr. 1 – C	CO ₂ + oras	8357,20	463,80	55,50
		Oras	8578,45	345,34	40,22
Giratorius	Nr. 1 – C	CO ₂ + oras	8836,91	366,77	72,81
		Oras	7857,85	382,65	48,70
	Nr. 2 – K	CO ₂ + oras	7876,72	13,32	1,69
		Oras	7883,00	5,36	0,68



44 pav. Cementinių bandinių gniuždymo bandymo grafikas

Pagal aukščiau pateiktą grafiką (žr. 44 pav.), matome, kad CO₂ dujų aplinkoje kietinti bandiniai, nepriklausomai nuo jų gamybos technologijos pasiekė didesnę gniuždomąją stiprį, nei kietinti ore. Presu gamintų cilindrinų cementinių bandinių gniuždomasis stipris padidėjo 1,38 karto, juos kietinant CO₂ aplinkoje, o giratoriumi pagamintų – 1,5 karto. Giratoriumi gamintų bandinių gniuždomasis stipris išaugo daugiau nei 2,3 karto, po kietinimo CO₂ dujų kameroje.



45 pav. Cementinių ir kalkinių bandinių gniuždomasis stipris









Diagramoje pateikti rezultatai parodo, kad bandiniai kietinti CO₂ aplinkoje turėjo didesni gniuždomąjį stiprį visais nagrinėtais atvejais, nepriklausomai nuo jų sudėties ar presavimo metodo. Presuotų karbonizuotų cementinių gaminių gniuždomasis stipris buvo 38 % didesnis nei kietintų ore, o giratoriumi gamintų cementinių gaminių gniuždomasis stipris buvo 49,5 % didesnis nei kietintų ore. Karbonizuotų bandinių su kalkiniu rišikliu gniuždomasis stipris buvo 148,5 % didesnis nei bandinių 28 paras kietintų ore.

Atlikus presavimo technologijos palyginimą gniuždomojo stiprio atžvilgiu, pastebėta, jog karbonizuoti bandiniai gaminti giratoriumi pasižymėjo 31,2 % didesniu gniuždomuoju stipriu už tos paties sudėties bandinius gamintus presu. Pagal rezultatus, galima spręsti, kad efektyvesnė presavimo technologija buvo naudojantis giratoriumi, kas lėmė didesni gniuždomojo stiprio augimą.

3.1.4. Karbonizacijos gylio nustatymas

Karbonizacijos lygis nustatomas pagal praeitame skyriuje aprašytą metodiką. Po gniuždymo bandymų bandiniai buvo perskeliami, paviršiai nuvalomi ir apipurškiami fenolftaleino tirpalu. Praėjus kelioms sekundėms ir paviršiuje pasimačius spalvos pokyčiams išmatuojamas nenusispalvinęs iki krašto atstumas. CO₂ įtaka karbonizacijai matoma 6 lentelėje.

6 lentelė. Cementinių ir kalkinių gaminių karbonizacijos gylis

Sudėtis ir kietinimo sąlygos	Nr. 1 C CO ₂ +oras	Nr. 1 C Oras	Nr. 1 C Oras
Karbonizacijos gylio nustatymas (bandiniai gaminti presu)			
Karbonizacijos gylis	~ 10 mm	~8 mm	~ 8 mm
Žymuo ir kietinimo sąlygos	Nr. 1 C CO ₂ +oras	Nr. 1 C Oras	Nr. 1 C Oras
Karbonizacijos gylio nustatymas (bandiniai gaminti giratoriumi)			
Karbonizacijos gylis	Įvyko pilna karbonizacija	~ 5 mm	Karbonizacija neįvyko arba įvyko nepilnai
Žymuo ir kietinimo sąlygos	Nr. 2 K CO ₂ +oras		Nr. 2 K Oras
Karbonizacijos gylio nustatymas (bandiniai gaminti giratoriumi)			
Karbonizacijos gylis	Įvyko nepilna karbonizacija		Karbonizacija neįvyko arba įvyko nepilnai

Pagal karbonizacijos gylio nustatymo vizualizacijas matosi, kad bandiniai kietinti CO₂ dujų aplinkoje geriau utilizuoja anglies dioksido dujas sparčiau sukurdami kalcio karbonatus t.y. sparčiau atlikdami karbonizaciją. Natūraliai kietintų bandinių su cementiniu rišikliu karbonizacijos gylis buvo 5-8 mm, o kietintų CO₂ dujų aplinkoje, karbonizacijos gylis siekė 10 mm ir daugiau.

3.2. 2 bandymų grupė - gamykloje formuotų grindinio trinkelėlių tyrimų rezultatai

3.2.1. Vandens įgėrio nustatymas

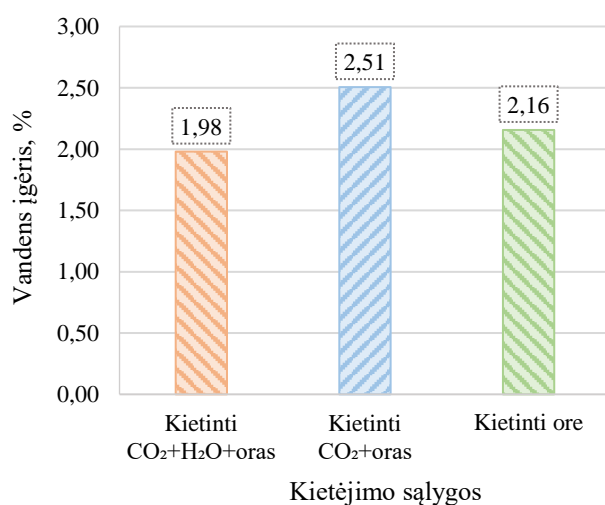
Prieš vandens įgėrio kinetikos nustatymo bandymus bandiniai buvo paruošiami juos išdžiovinant krosnyje 105±5 °C temperatūroje. Po džiovinimo bandiniai pasverti ir atliktas bandinių prisotinimas vandeniu vakuumo metodu. Po prisotinimo bandiniai pasverti ore bei vandenyje. Trinkelėlių vandens įgėrio nustatymui bei apskaičiavimui taikyti LST EN ISO 10545-3:2018 standarte aprašyti reikalavimai bei (2.4-2.10) formulės skirti klinkerinėms plytelėms [49].

7 lentelė. Trinkelėlių įgėties kinetika ir poringumas

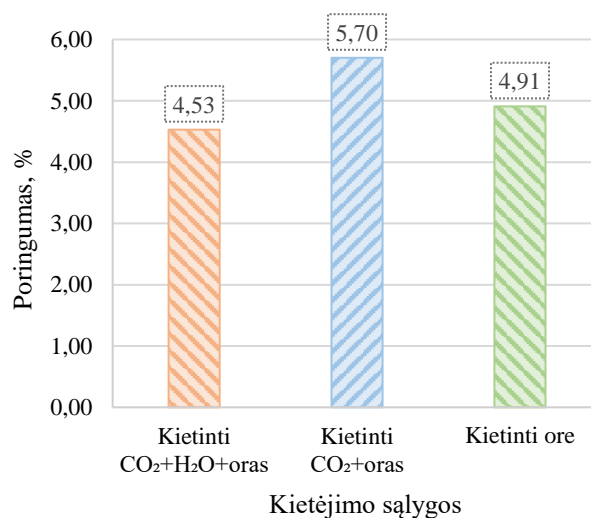
Kietėjimo sąlygos	Sauso elemento masė M ₁ , g	Šlapio elemento masė M ₂ [*] , g	Elemento masė vandenyje M ₃ ^{**} , g	Vandens įgėris E _v , %	Išorinis tūris V, cm ³	Atvirų porų tūris V ₀ , cm ³	Tūris V _t , cm ³	Poringumas, %	Tiriamasis santykinis tankis, g/cm ³	Tūrinis tankis, g/cm ³
CO ₂ + H ₂ O + oras	2569,9	2620,7	1497,5	1,98	1123,3	50,8	1072,4	4,53	2,396	2,288
CO ₂ + oras	2573,6	2638,1	1507,5	2,51	1130,7	64,5	1066,2	5,70	2,414	2,276
Oras	2607,1	2663,2	1519,4	2,16	1143,9	56,1	1087,8	4,91	2,397	2,279

* – elementas ištrauktas iš vandens; ** – elementas sveriamas vandenyje.

Pagal gautus skaičiavimų rezultatus matome, kad kietinimas CO₂ dujų aplinkoje neturėjo reikšmingos įtakos gamyklinių trinkelėlių vandens įgėrio reikšmei, poringumui bei tankiui. Vandens įgėrio reikšmė visose trinkelėse yra mažesnė nei 6 %, tai galima teigti, jog tiriamosios gamyklinės trinkelės atitinka vandens įgėrio reikalavimus betoninėms grindinio trinkelėms aprašytus LST EN 1338 [51].



46 pav. Trinkelėlių vandens įgėrio priklausomybė nuo kietinimo sąlygų



47 pav. Trinkelėlių poringumo priklausomybė nuo kietinimo sąlygų

Geriausi vandens įgėrio rezultatai pasiekti su trinkelėmis, kurios prieš patalpinimą į CO₂ kamerą buvo sudrėkinti po vandens srove. Sudrėkintų trinkelių vandens įgėrio reikšmė buvo 21 % mažesnė už sausiai karbonizuotus bandinius ir 8 % mažesnė už ore kietintus bandinius. Ta pati rezultatų kitimo tendencija matoma ir 47 paveikslėlyje pateiktuose poringumo diagramose. Pagal gautus rezultatus galima spręsti, jog pakartotinis bandinio sudrėkinimas pagerina vandens įgeriamumo ir poringumo savybes jas sumažinant.

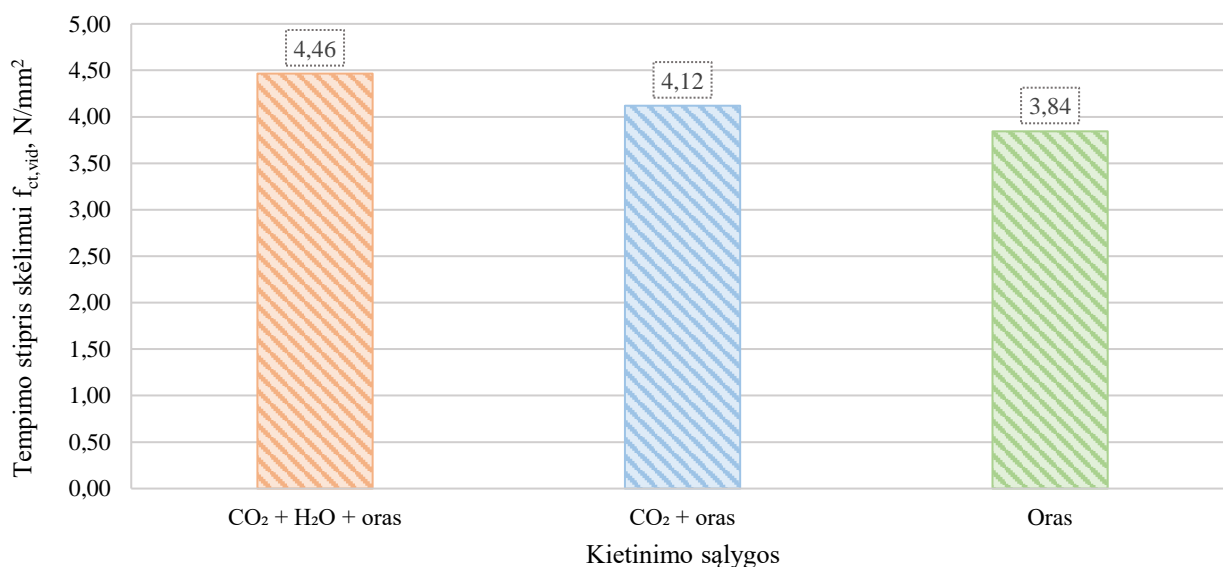
3.2.2. Skeliamojo stiprio nustatymas

Atliekant skeliamojo stiprio nustatymą, buvo naudojamas specialus apkrovimo rėmas (žr. 36 pav.), kuris per tarpiklius tolygiai perduoda didėjančią apkrovą 200×100×60 mm matmenų trinkelės bandiniui. Didžiausia ardomoji jėga nustatyta pagal LST EN 12390-6:2009 standarte aprašytą metodiką [47]. Tempiamasis stipris skėlimui apskaičiuotas pagal (2.11) formulę.

8 lentelė. Tempimo stiprio skėlimui skaičiavimo rezultatai

Kietėjimo sąlygos	CO ₂ + H ₂ O + oras	CO ₂ + oras	Oras
Didžiausia ardomoji jėga F, kN	140,2	129,4	120,7
Tempimo stipris skėlimui f_{ct} , N/mm ²	4,46	4,12	3,84

Atlikus bandymą, matome, kad bandinių kietinimas CO₂ dujų aplinkoje turi įtakos skeliamajam stipriui. Bandiniai kietinti anglies dioksido kameroje buvo 7-18 % atsparesni tempimui skeliant nei bandiniai kietinti natūraliai ore. Tiriamosios gamyklinės trinkelės atitinka atitikties kriterijus aprašytus LST EN 1338 standarte, kadangi visos tempimo stiprio skėlimui reikšmės yra didesnės už 3,6 MPa, o tiriamųjų trinkelių skaičius < 8 [51]. Bandinių tempimo stiprio skėlimui priklausomybė nuo kietinimo sąlygų pavaizduota grafiškai 48 paveikslėlyje.






48 pav. Tempimo stiprio skėlimui priklausomybė nuo kietinimo sąlygų

3.2.3. Karbonizacijos gylio nustatymas

Karbonizacijos gylis nustatomas pagal praeitame skyriuje aprašytą metodiką. Po skeliamojo stiprio bandymo, perskeltų bandinių paviršiai nuvalomi ir apipurškiami fenolfaleino tirpalu. Praėjus kelioms sekundėms ir paviršiuje pasimačius spalvos pokyčiams, išmatuojamas nenusispalvinęs atstumas iki krašto. CO₂ įtaka karbonizacijai matoma 9 lentelėje.

9 lentelė. Gamyklinių trinkelėlių karbonizacijos gylis

Žymuo ir kietinimo sąlygos	Oras	CO ₂ + oras	CO ₂ + H ₂ O + oras
Karbonizacijos gylis nustatymas			
Karbonizacijos gylis	~ 4 mm	~10 mm	~ 7 mm

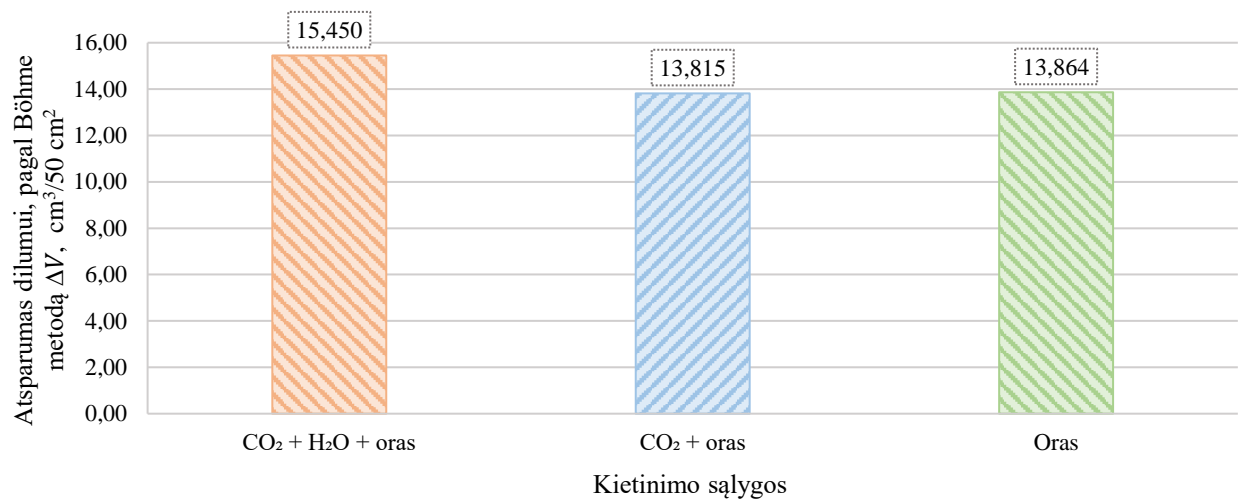
Pagal karbonizacijos gylio nustatymo vizualizacijas matosi, kad bandiniai kietinti CO₂ dujų aplinkoje geriau utilizuoja anglies dioksido dujas sparčiau sukurdami kalcio karbonatus t.y. sparčiau atlikdami karbonizaciją. Natūraliai kietintų bandinių su cementiniu rišikliu karbonizacijos gylis buvo ~ 4 mm, o kietintų CO₂ dujų aplinkoje, karbonizacijos gylis buvo 7-10 mm.

3.2.4. Dilumo nustatymas

Pagal praeitime skyriuje aprašytą metodiką atliekamas dilumo nustatymas Böhme metodu. Iš trinkelėlių išpjaunami 71×71×60 mm dydžio bandiniai, kurie išbandomi naudojant įranga pavaizduota 37 paveikslėlyje. Kiekvienas bandinys išbandomas po 16 ciklų, kas ketvirtą ciklą bandiniai pasverti ir apskaičiuota galutinė prarasta masė, pagal kurią apskaičiuoti tūrio nuostoliai nusakantys dilumą. Atsparumas dėvėjimuisi pagal Böhme A metodą po 16 ciklų apskaičiuotas pagal tūrio nuostolius (2.12) formule. Dilumo bandymų rezultatai pateikti 10 lentelėje.

10 lentelė. Dilumo bandymo duomenys

Kietinimo sąlygos	CO ₂ + H ₂ O + oras	CO ₂ + oras	Oras
a_{vid} , mm	71,9	71,6	70,5
b_{vid} , mm	70,9	72,1	70,8
h_{vid} , mm	61,0	60,3	60,2
m , g	690,69	690,26	666,94
m_1 , g	681,78	682,62	659,71
m_2 , g	673,05	674,43	652,19
m_3 , g	664,78	667,59	644,67
m_4 , g	656,32	659,60	636,16
Δm , g	34,37	30,66	30,78
ρ_R , g/cm ³	2,225	2,219	2,220
ΔV , cm ³	15,450	13,815	13,864
ΔV_{vid} , cm ³	14,377		



49 pav. Dilumo bandymo galutiniai rezultatai

Natūraliai ore kietintų trinkelėlių dilumo rodiklis $13,864 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$; sausai anglies dioksido kameroje kietintų bandinių dilumo rodiklis $13,815 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$, o drėgnai CO₂ aplinkoje kietintų – $15,450 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$. Atsižvelgus į gautus rezultatus, galima teigti, jog gamyklinių betoninių gaminių kietinimas CO₂ kameroje atsparumą gali sumažinti minimaliai, tačiau neužtikrinant optimalių sąlygų, dilumo rodiklis gali padidėti. Siekiant sumažinti trinkelėlių dilumą, būtų geriau rinktis trinkelėlių kietinimą jų nesudrėkinant.

3.2.5. Atsparumo šalčiui nustatymas

Atsparumo šalčiui nustatymui naudotas amerikiečių šildymo-šaldymo ciklų metodas, aprašytas praeitame skyriuje. Gamyklinės trinkelės buvo 20 parų apsemtos 0,5 cm vandens. Vizualinė patikra pateikta 11 lentelėje.

11 lentelė. Atsparumo šalčiui nustatymas – vizualinė patikra

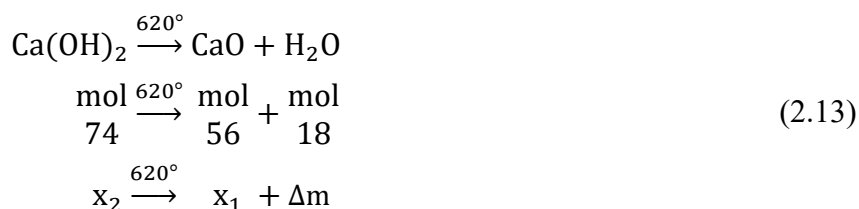
Kietinimo sąlygos	Bandinio vaizdas iš viršaus prieš bandymą	Bandinio vaizdas iš viršaus po bandymo
CO ₂ + H ₂ O + oras		
CO ₂ + oras		



Atlikus vizualinę patikrą, galima teigti, jog visos trinkelės buvo pažeistos labai panašiai, tad kietinimas CO₂ dujų aplinkoje reikšmingos įtakos betoninių gaminių atsparumui šalčiui neturėjo.

3.2.6. Cheminės sudėties tyrimas

Cheminės sudėties tyrimai atliekami siekiant nustatyti bandinių sudėtyje likusį kalcio oksido kiekį bei buvusį kalcio hidroksido kiekį. Tyrimo metodika aprašyta praeitame skyriuje. Pasinaudojant chemine lygtimi (2.13), sudaroma proporcija ir apskaičiuojami CaO ir Ca(OH)₂ kiekiai.



12 lentelė. Cheminės sudėties skaičiavimų rezultatai

Miltelių tipas (kietinimo sąlygos)	CO ₂ + H ₂ O + oras	CO ₂ + oras	Oras
Pradinis svoris m, g	18,000	18,000	18,000
Svoris po pirminio džiovavimo (105±5)°C temperatūroje m ₁ , g	17,301	17,285	17,214
Svoris po pirminio džiovavimo (620±5)°C temperatūroje m ₂ , g	16,439	16,586	16,418
Masės skirtumas Δm = m ₁ – m ₂ , g	0,862	0,699	0,796
CaO kiekis x ₁ , g	2,68	2,17	2,48
Ca(OH) ₂ kiekis x ₂ , g	3,54	2,87	3,27
CaO kiekis mišinyje, %	14,90	12,08	13,76
Ca(OH) ₂ kiekis mišinyje, %	19,69	15,96	18,18

Pagal 12 lentelėje pateiktus CaO ir Ca(OH)₂ kiekio rezultatus galima teigti, jog kietinimas CO₂ dujų aplinkoje gali ne tik padidinti šių cheminių junginių kiekį mišinyje, bet gali jį sumažinti, priklausomai nuo užtikrinamų kietinimo sąlygų.

Pagal gautus rezultatus, matome, kad trinkelės kietintos sausai CO₂ kameroje savo mišinyje turėjo 17,3 % mažiau Ca(OH)₂ dalelių nei trinkelių kietintų ore, tai reiškia, kad ~1/5 karto daugiau kalkių gali karbonizuotis lyginant su natūraliai sukietėjusiomis trinkelėmis.

3.2.7. pH lygio nustatymas

pH lygis nustatomas pagal praeitame skyriuje aprašytą metodiką. Elektroninio pH indikatoriaus bandinių pH vertės nurodytos 13 lentelėje.

13 lentelė. Bandinių pH vertės

Kietinimo sąlygos	CO ₂ + H ₂ O + oras	CO ₂ + oras	Oras
pH lygis	11,75	11,72	11,78

Gauti rezultatai parodo, jog kietinimas anglies dioksido dujų kameroje didelės įtakos betono pH vertės pasikeitimui neturėjo. Natūraliai kietintų bandinių vertė buvo 0,2-0,6% didesnė nei bandinių prisotintų CO₂ dujomis.

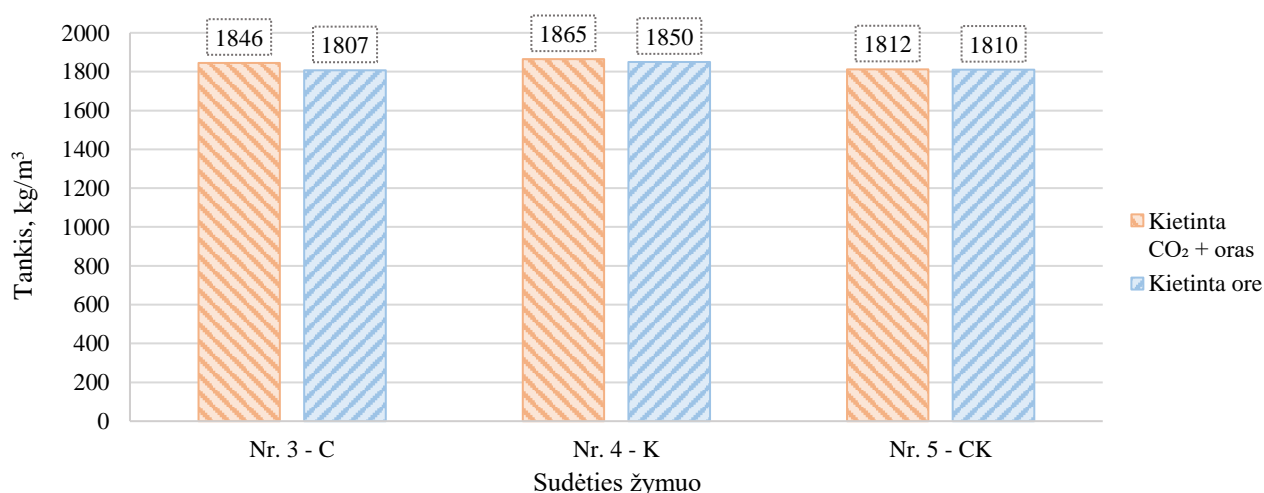
3.3. 3 bandymų grupė - presuotų plonasluoksnių bandinių eksperimentų rezultatai

3.3.1. Tankio nustatymas

Tankis nustatytas pagal praeitame skyriuje aprašytą metodiką. Bandinių tankis apskaičiuotas bandiniams kietintiems ore ir CO₂ aplinkoje, praėjus > 28 paroms nuo jų pagaminimo. Tankio reikšmės apskaičiuotos pagal (2.1) formulę, pateiktos 3 lentelėje.

14 lentelė. Cementinių ir kalkinių gaminių tankis po > 28 parų

Sudėtis ir sudėties žymuo	Kietėjimo sąlygos	H, mm	D, mm	Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Tankių skirtumas %
Nr. 3 – C	CO ₂ + oras	11,92	100,38	173,98	1845,74	2,1
	Oras	11,99	100,33	171,21	1807,36	
Nr. 4 – K	CO ₂ + oras	11,77	100,25	173,18	1864,77	0,8
	Oras	11,74	100,23	171,26	1850,49	
Nr. 5 – CK	CO ₂ + oras	9,56	100,57	137,47	1811,93	0,1
	Oras	9,66	100,49	138,64	1810,49	
Nr. 6 – B1	CO ₂ + oras	12,04	100,6	176,12	1841,27	-
Nr. 7 – B2	CO ₂ + oras	12,37	100,58	175,45	1786,04	
Nr. 8 – B3	CO ₂ + oras	12,05	100,21	173,08	1822,08	



50 pav. Cementinių ir kalkinių bandinių tankis

Rezultatai rodo, kad kietinimas CO₂ dujų aplinkoje turi įtakos tankio dydžiui – cementiniai bandiniai kietinti CO₂ aplinkoje buvo 0,1-2,1 % didesnio tankio nei kietinti ore, nepriklausomai nuo jų sudėties. Kalkiniai bandiniai kietinti CO₂ aplinkoje buvo 0,8 % mažesnio tankio nei kietinti ore. Tankio

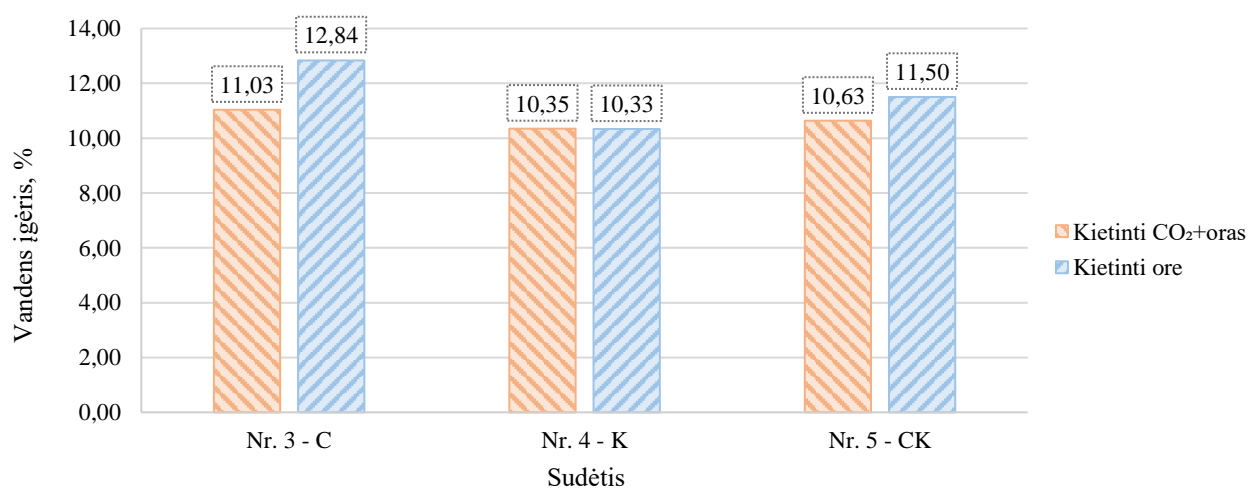
padidėjimą cementiniuose bandiniuose lėmė spartesnis kalcio karbonato susidarymas, todėl galima teigti, kad bandinys geriau karbonizavosi CO₂ aplinkoje.

3.3.2. Vandens įgėrio nustatymas

Prieš vandens įgėrio kinetikos nustatymo bandymus bandiniai buvo paruošiami juos išdžiovinant krosnyje 105±5 °C temperatūroje. Po džiovinimo bandiniai pasverti ir panardinti į vandenį. Po prisotinimo bandiniai pakartotinai pasverti ore bei vandenyje. Plonasluoksnių gaminių vandens įgėrio nustatymui bei apskaičiavimui taikyti LST EN ISO 10545-3:2018 standarte aprašyti reikalavimai bei (2.4-2.10) formulės skirti klinkerinėms plytelėms [49]. Rezultatai pateikiami 15 lentelėje.

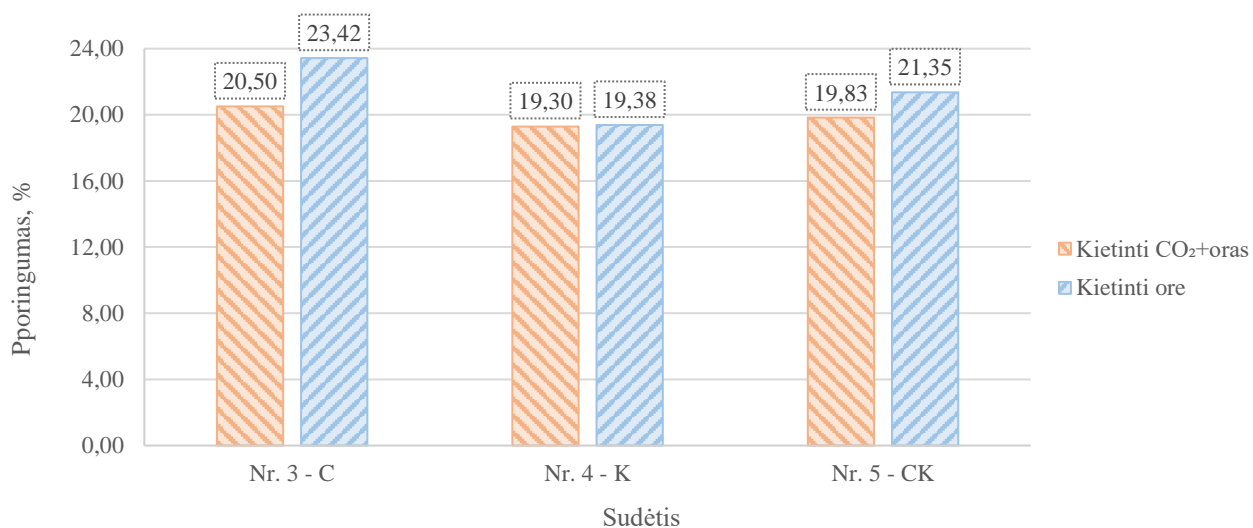
15 lentelė. Plonasluoksnių gaminių įgėties kinetika ir poringumas

Sudėtis ir sudėties žymuo	Kietėjimo sąlygos	Sauso elemento masė M ₁ , g	Šlapio elemento masė M ₂ [*] , g	Elemento masė vandenyje M ₃ ^{**} , g	Vandens įgėris E _v , %	Išorinis tūris V ₀ , cm ³	Atvirų porų tūris V ₀ , cm ³	Tūris V ₁ , cm ³	Poringumas, %	Tiriamasis santykinis tankis, g/cm ³	Tūrinis tankis, g/cm ³
Nr. 3 – C	CO ₂ + oras	174,76	194,04	100,00	11,03	94,04	19,28	74,76	20,50	2,338	1,858
	Oras	103,57	116,86	60,10	12,84	56,76	13,30	43,47	23,42	2,383	1,825
Nr. 4 – K	CO ₂ + oras	169,86	187,43	96,43	10,35	91,00	17,57	73,43	19,30	2,313	1,867
	Oras	172,19	189,98	98,19	10,33	91,79	17,79	74,00	19,38	2,327	1,876
Nr. 5 – CK	CO ₂ + oras	136,11	150,57	77,58	10,63	72,99	14,46	58,54	19,83	2,326	1,865
	Oras	139,99	154,22	79,31	10,17	74,91	14,23	60,68	19,00	2,307	1,869



51 pav. Trečios grupės bandinių vandens įgėrio priklausomybė nuo kietinimo sąlygų

Pagal gautus skaičiavimų rezultatus matome, kad kietinimas CO₂ dujų aplinkoje neturėjo reikšmingos įtakos plonasluoksnių bandinių vandens įgėrio reikšmei ar poringumui. Bandinius prisotinus anglies dioksido dujomis, jų poringumas ir vandens įgėris sumažėjo 7-15 %. Vandens įgėrio reikšmė visuose bandiniuose yra didesnė nei 6 %, tai galima teigti, jog tiriamieji gaminiai neatitinka vandens įgėrio reikalavimų betoninėms grindinio trinkelėms aprašytų LST EN 1338 [51].



52 pav. Trečios grupės bandinių vandens įgėrio priklausomybė nuo kietinimo sąlygų

Kalcio karbonato tankis, kaip mineralo, yra mažesnis nei kalcio hidrosilikato iš cemento, tačiau abiejų bandinių grupių (su kalkiniais ir cementiniais rišikliais) tankiai gavosi praktiškai vienodi, o tai galima paaiškinti tuo, kad kalcio karbonatas suauga didesniame vienetiniame bandinio tūryje. Vandens įgėrio eksperimentai parodė, kad karbonizuotų bandinių su kalkėmis įgėris yra 6,1 % mažesnis nei bandinių su cementiniu rišikliu.

3.3.3. Lenkiamojo stiprio nustatymas

Turimi apvalūs plonasluoksniai išpjaunami į plokštelės formos bandinius, lenkiamajam stipriui nustatyti. Lenkiamasis stipris nustatomas pagal praeitame skyriuje aprašytą metodiką, o rezultatai ir skaičiavimai pateikiami 16 lentelėje.



53 pav. Lenkimo bandymui paruoštas bandinys



54 pav. Suiręs bandinys pasiekęs didžiausią ardomąją apkrovą

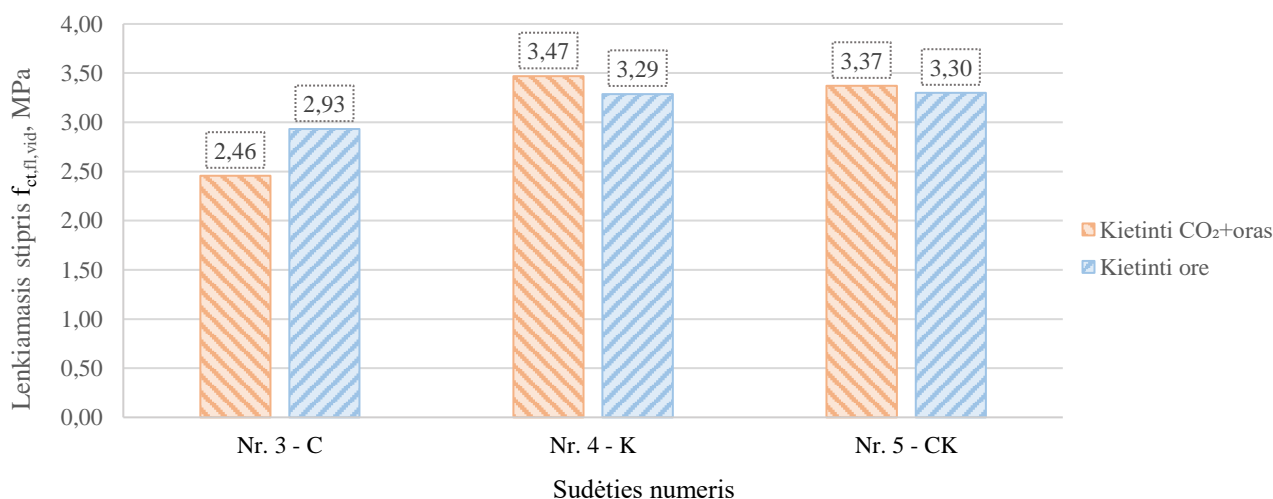
16 lentelė. Plonasluoksnių gaminių lenkiamasis stipris

Sudėtis ir sudėties žymuo	Kietėjimo sąlygos	d_1 , mm	d_2 , mm	F_0 , N	F , N	L , mm	$f_{ct,fl}$, MPa
Nr. 3 – C	CO ₂ + oras	50,12	12,01	80	156	76	2,46
	Oras	49,91	12,01	107	110		2,93
Nr. 4 – K	CO ₂ + oras	50,23	11,75	135	211		3,47
	Oras	50,23	11,67	122	198		3,29
Nr. 5 – CK	CO ₂ + oras	49,55	9,55	58	134		3,37
	Oras	48,64	9,64	55	131		3,30
Nr. 6 – B1	CO ₂ +oras	50,48	11,96	142	218		3,44
Nr. 7 – B2	CO ₂ +oras	50,00	12,37	104	180		2,68
Nr. 8 – B3	CO ₂ +oras	50,55	12,08	145	221	3,42	

Pagal rezultatus matome, jog kalkiniai bandiniai pasiekia geriausią lenkiamąjį stiprį, o cementiniai bandiniai – mažiausią. Cementiniai bandiniai, po karbonizacijos tapo silpnesni, jų lenkiamasis stipris sumažėjo 16,2 %; kalkiniai bandiniai po karbonizacijos tapo 5,5 % stipresni; cemento-kalkių rišiklio mišinio bandiniai po karbonizacijos pastiprėjo 2,1 %.

Lyginant cementinio rišiklio ir kalkinio rišiklio bandinius po karbonizacijos, kalkiniai bandiniai buvo 29,1 % stipresni, nors jie buvo kietinami tomis pačiomis sąlygomis. Kadangi plonasluoksniams gaminiams su cemento rišikliu gaunasi geresni lenkiamąjo stiprio rezultatai bandinių kietinant ore nei CO₂ kameroje, juos gaminant labai svarbu atsižvelgti į optimalų karbonizavimo režimą.

Pagal rezultatus pateiktus šiame skyriuje, galime daryti išvadą, kad naudoti neįprasti priedai (vyno rūgštis, kiaušinio baltymo milteliai ar chitosan milteliai) nepasiteisino ir reikšmingai nepagerino bandinių savybių. Galimai reikia atlikti detalesnį tyrimą siekiant iširti galimą šių priedų teigiamą įtaką cementiniams ar kalkiniams bandiniams. Bandinių lenkiamasis stipris pateiktas grafiškai 55 paveikslėlyje.



























55 pav. Plonasluoksnių gaminių lenkiamąjo stiprio priklausomybė nuo sudėties ir kietinimo sąlygų

3.3.4. Karbonizacijos gylio nustatymas

Karbonizacijos lygis nustatomas pagal praeitame skyriuje aprašytą metodiką. Po lenkiamojo stiprio bandymo perskeltų bandinių paviršiai nuvalomi ir apipurškiami fenolftaleino tirpalu. Praėjus kelioms sekundėms atliekama vizuali patikra nustatyti ar bandinys karbonizavosi. CO₂ įtaka karbonizacijai matoma 17 lentelėje.

17 lentelė. Karbonizacijos gylis

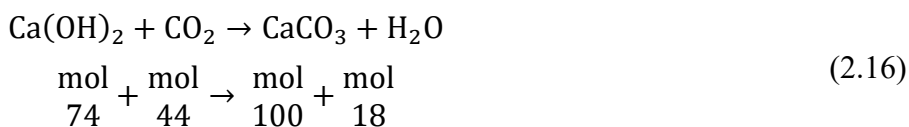
Sudėtis ir sudėties žymuo	Nr. 3 – C						
Kietinimo sąlygos	CO ₂ + oras				Oras		
Karbonizacijos gylio nustatymas							
Karbonizacijos gylio įvertinimas	Visuose cementiniuose bandiniuose, kietintuose CO ₂ dujų aplinkoje bei ore įvyko pilna karbonizacija						
Sudėtis ir sudėties žymuo	Nr. 4 – K						
Kietinimo sąlygos	CO ₂ + oras				Oras		
Karbonizacijos gylio nustatymas							
Karbonizacijos gylio įvertinimas	Įvyko pilna karbonizacija				Karbonizacija neįvyko arba įvyko nepilnai		

Sudėtis ir sudėties žymuo	Nr. 5 – CK				
Kietinimo sąlygos	CO ₂ + oras			Oras	
Karbonizacijos gylio nustatymas					
Karbonizacijos gylio įvertinimas	Įvyko pilna karbonizacija			Karbonizacija neįvyko arba įvyko nepilnai	
Sudėtis ir sudėties žymuo	Nr. 4 – K		Nr. 6 – B1	Nr. 7 – B2	Nr. 8 – B3
Kietinimo sąlygos	Oras		CO ₂ + oras		
Karbonizacijos gylio nustatymas					
Karbonizacijos gylio įvertinimas	Įvyko pilna karbonizacija		Karbonizacija neįvyko arba įvyko nepilnai	Įvyko pilna karbonizacija	

Pagal karbonizacijos gylio nustatymo vizualizacijas matosi, kad cementiniai bandiniai kietinti CO₂ dujų aplinkoje pilnai karbonizavosi, tai reiškia jie geriau utilizuoja anglies dioksido dujas sparčiau sukurdami kalcio karbonatus t.y. sparčiau atlikdami karbonizaciją. Bandiniai su maišytu cemento-kalkių rišikliu, kietinti CO₂ dujų aplinkoje pilnai karbonizavosi, tačiau tuose pačiuose bandiniuose kietintuose natūraliai ore karbonizacija neįvyko. Kalkiniuose bandiniuose pilna karbonizacija įvyko CO₂ dujomis kietintuose bandiniuose, tačiau ore kietintuose bandiniuose karbonizacija neįvyko.

4. Bandinių įsisavinto CO₂ dujų kiekis

Bandinių įsisavintas CO₂ dujų kiekis apskaičiuojamas pagal tankio pokytį naudojantis praeitame skyriuje pateikta 2.16 chemine formule sudaroma proporcija pagal kurią apskaičiuojamas ir kalkių kiekis.. Šiame skyriuje atliekami skaičiavimai visoms 3 bandinių grupėms.



Kalkių kiekio apskaičiavimui sudaryta proporcija pagal 2.16 cheminę lygtį:

$$\frac{74 - 100}{x_1 - \Delta D} \rightarrow x_2 = \frac{x_1 \cdot 44}{74}$$

CO₂ dujų kiekio apskaičiavimui sudaryta proporcija pagal 2.16 cheminę lygtį:

$$\frac{74 - 44}{x_1 - x_2} \rightarrow x_2 = \frac{x_1 \cdot 44}{74}$$

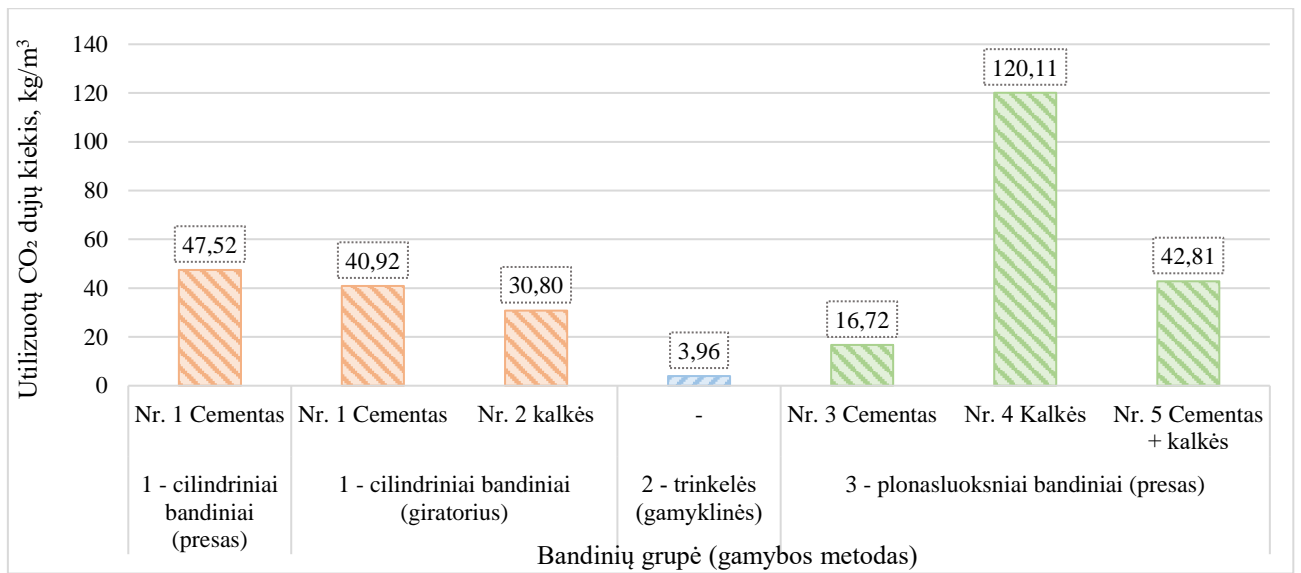
18 lentelė. Kalkių ir įsisavintų CO₂ dujų kiekis

Bandinių grupė (gamybos metodas)	Sudėtis ir sudėties žymuo	CO ₂ dujomis kietintų bandinių tankis, kg/m ³	Natūraliai ore kietintų bandinių tankis, kg/m ³	Tankių skirtumas, ΔD, kg/m ³	Sunaudotų kalkių kiekis x ₁ , kg/m ³	Utilizuotų CO ₂ dujų kiekis x ₂ , kg/m ³	Utilizuotų CO ₂ dujų kiekis, %
1 - cilindriniai bandiniai (presas)	Nr. 1 – C	2320	2212	108	79,92	47,52	2,05
1 - cilindriniai bandiniai (giratorius)	Nr. 1 – C	2266	2173	93	68,82	40,92	1,81
	Nr. 2 – K	1610	1540	70	51,80	30,80	1,91
2 - trinkelės (gamyklinės)	-	2288	2279	9	6,66	3,96	0,17
3 - plonasluksniai bandiniai (presas)	Nr. 3 – C	1846	1808	38	28,12	16,72	0,91
3 - plonasluksniai bandiniai (presas)	Sudėtis ir sudėties žymuo	CO ₂ dujomis kietintų bandinių tankis, kg/m ³	Kalkių kiekis mišinio sudėtyje x ₁ , kg/m ³		Utilizuotų CO ₂ dujų kiekis x ₂ , kg/m ³		Utilizuotų CO ₂ dujų kiekis, %
	Nr. 4 – K	1865	202		120,11		6,44
	Nr. 5 – CK	1882	72		42,81		2,27

* - apskaičiuotas santykis tarp utilizuotų CO₂ dujų kiekio ir CO₂ dujomis kietinto bandinių tankio.

Po atliktų CO₂ dujų įsisavinimo skaičiavimų, pastebima, kad geriausiai dujas utilizavo plonasluksniai kalkiniai gaminiai gaminti presu (120,11 kg/m³), o mažiausiai dujų utilizavo gamyklinės trinkelės (6,66 kg/m³). Pagal gautus rezultatus, karbonizuoti cilindriniai gaminiai, gaminti presu įsisavino 16,1 % daugiau anglies dioksido dujų, nei gaminti giratoriumi.

Plonasluksniai kalkiniai gaminiai (iki 1,3 cm aukščio) karbonizacijos metu utilizavo didžiausią kiekį CO₂ dujų lyginant visas plonasluksnių gaminių sudėtis. Šie gaminiai dėl mišinio sudėties ir didelio Ca(OH)₂ kiekio gebėjo prisijungti daugiau CO₂ dujų dalelių, nei cementiniai ar maišyti cementiniai-kalkiniai bandiniai.



56 pav. Utilizuotų CO₂ dujų kiekis skirtingų grupių bandiniuose

Išvados

1. Tyrimams buvo pagaminti 8 skirtingų sudėčių plonasluoksniai kompozito bandiniai su cemento ir kalkių rišikliais, kurių dalis buvo kietinti įprastu būdu ore, o dalis - automatizuotoje CO₂ dujų kameroje (20 °C temperatūra, 65% santykinė oro drėgmė ir 19% anglies dioksido dujų koncentracija).
2. Presu arba giratoriumi presuotų ir vėliau karbonizuotų didesnio aukščio cilindro formos bandinių, su cementiniu rišikliu, tankis padidėjo tik 4,3-4,9 %, lyginant su natūraliai kietintais bandiniais. Rezultatai parodė, kad CO₂ kietinimas turi įtakos tankio dydžiui, t.y. jį padidina, nepriklausomai presavimo technologijos, tačiau beveik neturėjo įtakos vandens įgėriui. Pagrindinis skirtumas, pastebimas tarp skirtingų presavimo metodų buvo vertinant gniuždymo stiprį – karbonizuoti cementiniai cilindriniai bandiniai gaminti giratoriumi, pasižymėjo 31,2 % didesniu gniuždymo stipriu, nei presuoti hidrauliniu presu.
3. Plonasluoksnių (iki 1,3 cm aukščio) bandinių, su cementiniu rišikliu, tankis po karbonizacijos padidėjo per 2,1 %, o vandens įgėris sumažėjo net apie 15 %. Tačiau atlikus šių cementinių bandinių lenkiamojo stiprio bandymus, buvo gauta, jog po karbonizacijos lenkimo stipris sumažėjo apie 16 %. Tai galima paaiškinti tuo, jog susidaręs kalcio karbonatas padidina bandinių trapumą.
4. Plonasluoksnių (iki 1,3 cm aukščio) bandinių, su kalkiniu rišikliu, tankis po karbonizacijos padidėjo per 0,8 %, o vandens įgėris pakito nereikšmingai t.y. iš 10,33 % į 10,35 %. Tačiau atlikus šių kalkinių bandinių lenkiamojo stiprio bandymus, buvo gauta, jog po karbonizacijos lenkimo stipris padidėjo apie 5,5 %. Lyginant karbonizuotus cementinius ir kalkinius plonasluoksnius (iki 1,3 cm aukščio) bandinius tarpusavyje cementiniai bandiniai pasižymėjo 6,5 % didesniu vandens įgėriu, atitinkamai ir poringumu, tačiau karbonizuoti kalkiniai bandiniai buvo daugiau nei 41 % atsparesni lenkimui, nei cementiniai.
5. Atlikus bandinių karbonizacijos gylio matavimus fenolftaleino metodu, nustatyta, jog karbonizacijai didelę įtaką turi bandinių aukštis ir presavimo metodas. Plonasluoksnių gaminių karbonizacija įvyko iki galo, o apie 10 kartų didesnio dydžio cilindro formos bandinių branduolio viduje lieka dalis nesusikarbonizavusių kalkių, nes dujoms sunkiau pasiekti gilesnius sluoksnius.
6. Atlikus eksperimentinius kietinimo CO₂ aplinkoje bandymus su gamyklinėmis betono grindinio trinkelėmis, buvo nustatyta, kad pakartotinis trinkelių sudrėkinimas, prieš kietinant CO₂ aplinkoje, siek tiek pagerina vandens įgėrio ir poringumo rezultatų reikšmes, o tempiamąjį stiprį skeliant padidino nuo 7 iki 18 %, nei bandiniai kietinti natūraliai ore. Kapiliarinio šaldymo bandymai parodė, kad karbonizacija neturėjo įtakos trinkelių atsparumui šalčiui, tačiau dilumas nežymiai sumažėjo. Atlikus vizualų karbonizacijos gylio nustatymą fenolftaleino metodu, įsitikinta, kad karbonizacija sparčiau vyko CO₂ dujomis kietintuose bandiniuose (karbonizacijos gylis siekė 7-10 mm, kai natūraliai ore kietintų bandinių buvo tik 4 mm).
7. Įvertinus sutrupintų trinkelių cheminės kalkių sudėties skaičiavimus po kaitinimo krosnyje, nustatyta, kad CO₂ kameroje kietintos sausos trinkelės, savo mišinyje turėjo 17,3 % mažiau kalkių nei ore kietintos trinkelės, todėl galima teigti, kad priverstinė karbonizacija yra gana efektyvi.
8. Atlikus įsisavintų CO₂ dujų kiekio bandiniuose apskaičiavimus pagal tankio skirtumus, teoriškai apskaičiuota, kad didžiausią CO₂ kiekį utilizavo plonasluoksniai kalkiniai bandiniai gaminti presu (120,11 kg/m³). Mažiausią CO₂ kiekį sunaudėjo trinkelės – 3,96 kg/m³. Gamykloje gaminti gaminiai pasižymėjo mažesniu CO₂ dujų įgeriamumu, todėl mažesnis kiekis kalkių sureagavo su dujomis.

Literatūros šaltiniai

1. MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. and P. Kumar. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. ed. New York: New York: McGraw-Hill, 2014. Prieiga per: <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.ktu.edu/content/book/9780071797870> ISBN 9780071797870.
2. GRIFFITHS, S., et al. Decarbonizing the Cement and Concrete Industry: A Systematic Review of Socio-Technical Systems, Technological Innovations, and Policy Options. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, vol. 180. pp. 113291. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123001478> ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2023.113291.
3. LI, L., LIU, Q., HUANG, T. and PENG, W. Mineralization and Utilization of CO₂ in Construction and Demolition Wastes Recycling for Building Materials: A Systematic Review of Recycled Concrete Aggregate and Recycled Hardened Cement Powder. Separation and Purification Technology, 2022, vol. 298. pp. 121512. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586622010681> ISSN 1383-5866. DOI 10.1016/j.seppur.2022.121512.
4. WINNEFELD, F., LEEMANN, A., GERMAN, A. and LOTHENBACH, B. CO₂ Storage in Cement and Concrete by Mineral Carbonation. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2022, vol. 38. pp. 100672. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452223622000840> ISSN 2452-2236. DOI 10.1016/j.cogsc.2022.100672.
5. POSSAN, E., et al. CO₂ Uptake Potential due to Concrete Carbonation: A Case Study. Case Studies in Construction Materials, 2017, vol. 6. pp. 147-161. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509516300493> ISSN 2214-5095. DOI 10.1016/j.cscm.2017.01.007.
6. LI, L. and WU, M. An Overview of Utilizing CO₂ for Accelerated Carbonation Treatment in the Concrete Industry. Journal of CO₂ Utilization, 2022, vol. 60. pp. 102000. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982022001196> ISSN 2212-9820. DOI 10.1016/j.jcou.2022.102000.
7. ZHI, K., et al. A Review of CO₂ Utilization and Emissions Reduction: From the Perspective of the Chemical Engineering. Process Safety and Environmental Protection, 2023, vol. 172. pp. 681-699. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582023001453> ISSN 0957-5820. DOI 10.1016/j.psep.2023.02.046.
8. Kaminskas Rimvydas. Rišamųjų Medžiagų Gaminių Technologija . KTU leidykla 'Technologija', 2016Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/1356/risamuju-medziagu-gaminiu-technologija/> ISBN 978-609-02-1206-6.
9. KABIR, H.&.S., Mojtaba. Reactive Silica Sand Powder Concrete (RSSPC) Uniaxial Compressive Strength Investigation. The Open Access Journal of Science and Technology, 2017, vol. 5. pp. 8 ISSN 1012-30. DOI 10.11131/2017/101230.
10. Sasnauskas Vytautas, Rudžionis Žymantas and Deltuva Juozas. Statybinių Medžiagų Technologiniai Procesai. Vitae Litera, 2007Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/361/statybiniu-medziagu-technologiniai-procesai/> ISBN 978-9955-686-55-2.

11. EKOLU, S.O. A Review on Effects of Curing, Sheltering, and CO₂ Concentration upon Natural Carbonation of Concrete. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 127. pp. 306-320. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816314969> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056.
12. LIANG, C., et al. Utilization of CO₂ Curing to Enhance the Properties of Recycled Aggregate and Prepared Concrete: A Review. *Cement and Concrete Composites*, 2020, vol. 105. pp. 103446. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946519312892> ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2019.103446.
13. YI, Z., WANG, T. and GUO, R. Sustainable Building Material from CO₂ Mineralization Slag: Aggregate for Concretes and Effect of CO₂ Curing. *Journal of CO₂ Utilization*, 2020, vol. 40. pp. 101196. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982020302444> ISSN 2212-9820. DOI 10.1016/j.jcou.2020.101196.
14. CHEN, K., et al. An Overview on the Influence of various Parameters on the Fabrication and Engineering Properties of CO₂-Cured Cement-Based Composites. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 366. pp. 132968. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622025604> ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2022.132968.
15. LIU, D., et al. Internal Carbonation Curing Base on Molecular Sieve: Influence and Mechanism on Cement-Based Materials. *Materials Letters*, 2022, vol. 309. pp. 131454. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X21021534> ISSN 0167-577X. DOI 10.1016/j.matlet.2021.131454.
16. LIU, B., et al. New Perspectives on Utilization of CO₂ Sequestration Technologies in Cement-Based Materials. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 272. pp. 121660. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820336643> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.121660.
17. HE, P., et al. Effect of further Water Curing on Compressive Strength and Microstructure of CO₂-Cured Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2016, vol. 72. pp. 80-88. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516302062> ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.026.
18. China Architecture and Building Press. C. Standard, Standard for Test Methods of Long-Term Per-Formance and Durability of Ordinary Concrete (GB/T50082-2009). Beijing,China, 2009 ISBN GB/T50082-2009.
19. ZHAN, B.J., XUAN, D.X., POON, C.S. and SHI, C.J. Effect of Curing Parameters on CO₂ Curing of Concrete Blocks Containing Recycled Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 2016, vol. 71. pp. 122-130. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516301275> ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.002.
20. HAN, S.H., JUN, Y. and KIM, J.H. The use of Alkaline CO₂ Solvent for the CO₂ Curing of Blast-Furnace Slag Mortar. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 342. pp. 127977. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822016464> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.127977.
21. LI, N., MO, L. and UNLUER, C. Emerging CO₂ Utilization Technologies for Construction Materials: A Review. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, vol. 65. pp. 102237. Prieiga per:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982022003560> ISSN 2212-9820. DOI 10.1016/j.jcou.2022.102237.

22. TAM, V.W., BUTERA, A. and LE, K.N. Mechanical Properties of CO₂ Concrete Utilising Practical Carbonation Variables. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 294. pp. 126307. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621005278> ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.126307.

23. ZHANG, D., GHOULEH, Z. and SHAO, Y. Review on Carbonation Curing of Cement-Based Materials. *Journal of CO₂ Utilization*, 2017, vol. 21. pp. 119-131. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982017302524> ISSN 2212-9820. DOI 10.1016/j.jcou.2017.07.003.

24. SONG, Q., GUO, M., WANG, L. and LING, T. Use of Steel Slag as Sustainable Construction Materials: A Review of Accelerated Carbonation Treatment. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 173. pp. 105740. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921003499> ISSN 0921-3449. DOI 10.1016/j.resconrec.2021.105740.

25. TURNER, L.K. and COLLINS, F.G. Carbon Dioxide Equivalent (CO₂-E) Emissions: A Comparison between Geopolymer and OPC Cement Concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 43. pp. 125-130. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813000871> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023.

26. XUAN, D., ZHAN, B. and POON, C.S. A Maturity Approach to Estimate Compressive Strength Development of CO₂-Cured Concrete Blocks. *Cement and Concrete Composites*, 2018, vol. 85. pp. 153-160. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516304929> ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.005.

27. Wang Yung-Chih, et al. CO₂ Curing on the Mechanical Properties of Portland Cement Concrete. *Buildings* 2022, 2022. pp. 12. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/361291306_CO2_Curing_on_the_Mechanical_Properties_of_Portland_Cement_Concrete ISSN 2075-5309. DOI 10.3390/buildings12060817.

28. Kumar T. Santhosh, BALAJI, K., Reddy S. Thrinok Nath and Rao G. Srinivas. Mechanical Properties of Concrete when Cured with Carbon Dioxide. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019, vol. 8, no. 6. Prieiga per: <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v8i6/F8497088619.pdf> ISSN 2249-8958. DOI 10.35940/ijeat.F8497.088619.

29. KAMAL, N.L.M., ITAM, Z., SIVAGANESE, Y. and BEDDU, S. Carbon Dioxide Sequestration in Concrete and its Effects on Concrete Compressive Strength. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 31. pp. A18-A21. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320387939> ISSN 2214-7853. DOI 10.1016/j.matpr.2020.11.185.

30. WANG, T., et al. An Industrial Demonstration Study on CO₂ Mineralization Curing for Concrete. *iScience*, 2022, vol. 25, no. 5. pp. 104261. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004222005314> ISSN 2589-0042. DOI 10.1016/j.isci.2022.104261.

31. ZHANG, D. and SHAO, Y. Surface Scaling of CO₂-Cured Concrete Exposed to Freeze-Thaw Cycles. *Journal of CO₂ Utilization*, 2018, vol. 27. pp. 137-144. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982018300635> ISSN 2212-9820. DOI 10.1016/j.jcou.2018.07.012.
32. YU, Z., et al. Influences of W/C and CO₂ Curing Duration on the High Temperature Properties of Cement Pastes. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 69. pp. 106293. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223004722> ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.jobe.2023.106293.
33. LI, Z., HE, Z. and CHEN, X. The Performance of Carbonation-Cured Concrete, Nov 12, 2019, no. *Materials (Basel)* DOI 10.3390/ma12223729.
34. ELSALAMAWY, M., MOHAMED, A.R. and KAMAL, E.M. The Role of Relative Humidity and Cement Type on Carbonation Resistance of Concrete. *Alexandria Engineering Journal*, 2019, vol. 58, no. 4. pp. 1257-1264. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016819301115> ISSN 1110-0168. DOI 10.1016/j.aej.2019.10.008.
35. LU, B., et al. Effect of Temperature on CO₂ Curing, Compressive Strength and Microstructure of Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 2022, vol. 157. pp. 106827. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884622001181> ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2022.106827.
36. ZHAN, B.J., POON, C.S. and SHI, C.J. Materials Characteristics Affecting CO₂ Curing of Concrete Blocks Containing Recycled Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 2016, vol. 67. pp. 50-59. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946515300652> ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.003.
37. LIN, R., WANG, X. and Yi-Han. Effects of Cement Types and Addition of Quartz and Limestone on the Normal and Carbonation Curing of Cement Paste. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 305. pp. 124799. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821025514> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.124799.
38. SIDDIQUE, S., NAQI, A. and JANG, J.G. Influence of Water to Cement Ratio on CO₂ Uptake Capacity of Belite-Rich Cement upon Exposure to Carbonation Curing. *Cement and Concrete Composites*, 2020, vol. 111. pp. 103616. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946520301086> ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2020.103616.
39. LIU, Z. and MENG, W. Fundamental Understanding of Carbonation Curing and Durability of Carbonation-Cured Cement-Based Composites: A Review. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, vol. 44. pp. 101428. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982020310581> ISSN 2212-9820. DOI 10.1016/j.jcou.2020.101428.
40. El-Hassan Hilal. Accelerated Carbonation Curing as a Means of Reducing Carbon Dioxide Emissions. *Cement Industry - Optimization, Characterization and Sustainable Application*, 2021 DOI <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93929>.
41. *Betonas. Specifikacija, Eksploatacinės Savybės, Gamyba Ir Atitiktis*. 2021-05-31.; Lietuviška versija: 2021-07-30. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2021.

42. Cementas. 1 Dalis. Įprastinių Cementų Sudėtis, Techniniai Reikalavimai Ir Atitikties Kriterijai. 2011-12-30.; Lietuviška versija: 2012-11-27. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2012.
43. Statybinės Kalkės. 1 Dalis. Apibrėžtys, Techniniai Reikalavimai Ir Atitikties Kriterijai. 2015-08-31. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015.
44. Sukietėjusio Betono Bandymai. 1 Dalis. Pavidalas, Matmenys Ir Kiti Bandinių Bei Liejimo Formų Reikalavimai. 2021-09-15. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2021.
45. Sukietėjusio Betono Bandymai. 3 Dalis. Bandinių Gniuždymo Stipris. 2019-09-30.; Lietuviška versija: 2020-10-30. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020.
46. Sukietėjusio Betono Bandymai. 5 Dalis. Bandinių Lenkimo Stipris. 2019-09-30.; Lietuviška versija: 2022-03-31. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2022.
47. Betono Bandymas. 6 Dalis. Bandinių Tempimo Stipris Skeliant. 2010-04-16. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2010.
48. [LST EN 12390-7:2009]. Sukietėjusio Betono Bandymai: Testing Hardened Concrete. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
49. Keraminės Plytelės. 3 Dalis. Vandens Įmirkio, Tariamojo Poringumo, Tariamojo Santykinio Tankio Ir Tankio Nustatymas (ISO 10545-3:2018). 2018-06-29. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2018.
50. Keraminės Plytelės. Apibrėžtys, Klasifikavimas, Charakteristikos, Eksploatacinių Savybių Pastovumo Vertinimas Ir Tikrinimas Bei Ženklinimas. 2016-10-10. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.
51. Betoninės Grindinio Trinkelės. Reikalavimai Ir Bandymo Metodai. 2003-11-01.; Lietuviška versija: 2008-06-20. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2008.
52. Grindų Išlyginamųjų Medžiagų Bandymo Metodai. 3 Dalis. Atsparumo Dėvėjimuisi Nustatymas Böhme Metodu. 2015-04-17. ed. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015.
53. ANYKŠČIŲ KVARCAS. Smėlis Kvarcinis (0-0.4mm) 25kg (40). Prieiga per: <https://e-gulbele.lt/kvarcinis-smelis/9213-smelis-kvarcinis-0-04mm-25kg-40.html>.
54. ANYKŠČIŲ KVARCAS. Produktai: Džiovinatas Kvarcinis Smėlis. Prieiga per: <https://www.akvarcas.lt/produktai>.
55. Pilkas Cementas Akmenės Cementas EXTRA, 42.5 N, 35 Kg. Prieiga per: <https://www.senukai.lt/p/pilkas-cementas-akmenes-cementas-extra-42-5-n-35-kg/l6au>.
56. AKMENĖS CEMENTAS. Cemento Tipai - CEM I 42,5 N. Prieiga per: <https://cementas.lt/produkcija/cemento-tipai/>.
57. NATURA. Gesintos Kalkės 25kg. Prieiga per: <https://www.statybuturgus.lt/cementas-ir-kiti-misiniai/10377-gesintos-kalkes-25kg.html>.

58. LHoist NATURA. EKSPLOATACINIŲ SAVYBIŲ DEKLARACIJA. Prieiga per:
https://sakret.lv/wp-content/uploads/2016/05/1003-ESD-16-01-11-Statybin%C4%97s-kalkes_Natura_PL-lt.pdf.

Priedai

1 priedas. Dalyvavimas mokslinėje konferencijoje „Smart Built Environment“

STUDENT SCIENTIFIC CONFERENCE



CERTIFICATE

Monika Druskevičiūtė

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

Delivered the presentation:
Research of CO2 Curing Impact on Thin-layer Product Properties

Dean of the Faculty of Civil
Engineering and Architecture

Prof. Dr. Andrius Jurelionis

