



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir Architektūros fakultetas

Presuotų betono gaminių gamyba „žaliosios“ technologijos būdu, kietinant CO₂ aplinkoje

Baigiamasis magistro projektas

Eglė Steponavičiūtė

Projekto autorė

Doc. Algirdas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Presuotų betono gaminių gamyba „žaliosios“ technologijos būdu, kietinant CO₂ aplinkoje

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6211EX008)

Eglė Steponavičiūtė

Projekto autorė

Doc. Algirdas Augonis

Vadovas

Doc. Audrius Grinys

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Eglė Steponavičiūtė

Presuotų betono 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.

Eglė Steponavičiūtė

Patvirtinta elektroniniu būdu

Steponavičiūtė, Eglė. Presuotų betono gaminių gamyba „žaliosios“ technologijos būdu, 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, Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: CO₂, kietėjimo karbonizacija, betono karbonizacija, cementas, kalkės.

Kaunas, 2022. 53 p.

Santrauka

Magistro baigiamojo darbo tikslas – žaliosios technologijos būdu, kietinant CO₂ dujomis pagaminti presuotus gaminius ir nustatyti jų savybes. Darbą sudaro trys pagrindinės dalys: literatūros analizė, tyrimų metodika ir tyrimo rezultatai.

Literatūros analizės dalyje surinkta informacija apie presuotus gaminius (panaudojimas, gamybos technologija, savybės) ir kietinimą CO₂ dujomis (kietinimo mechanizmas, technologinių kietinimo parametrų įtaką, žaliuoju būdu kietintų gaminių savybės ir dujų utilizacija).

Tyrimų metodikos skyriuje daugiausiai dėmesio skiriama bandiniams ir magistro darbe atliktiems tyrimams. Šioje dalyje pateikiama bandinių sudėtis ir jų gamybos aprašas bei kietinimo sąlygos. Taip pat aprašomi atlikti eksperimentiniai tyrimai, jų eiga ir pateikiamos formulės rezultatams apskaičiuoti.

Trečioji dalis – tyrimų rezultatai, šioje dalyje išdėstomi ir analizuojami gauti eksperimentų rezultatai. Šią dalį sudaro stiprio gniuždant, karbonizacijos gylio ir vandens įgeriamumo bandymų rezultatai. Daugiausiai dėmesio skiriama rezultatų analizei tarp ore ir CO₂ aplinkoje kietintų bandinių, tai pat kaip kinta bandinių savybės atsižvelgiant į karbonizacijos laiką. Dar buvo lyginamos cementinių ir kalkinių bandinių savybės po kietinimo karbonizacijos. Rezultatams iliustruoti naudojamos diagramos. Analizuojant gautus rezultatus pateikiamos prielaidos.

Magistro baigiamasis darbas apibendrinamas 8-niomis išvadomis.

Baigiamojo darbo apimtis be priedų – 53 psl., darbe pateikti 48 paveikslai, 9 lentelės ir 30 literatūros šaltinių.

Steponavičiūtė Eglė. Manufacturing of Pressed Concrete Products Using “Green” Technology by Curing in a CO₂ Environment. Master’s Final Degree Project / supervisor dr. Algirdas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering science, Structural and Building Products Engineering.

Keywords: CO₂, curing carbonation, concrete carbonation, cement, lime

Kaunas, 2022. 53 p.

Summary

The aim of Master’s Thesis is to produce pressed concrete products using „green“ technology by curing them in CO₂ and determine their properties. Master’s Thesis consists of three main parts: literature analysis, research methodology and research results.

The literature analysis section is divided in two main parts - information about pressed concrete products and “green” curing. Part about pressed concrete products contains information about use of products, manufacturing technology and properties. In part about “green“ curing I have analyzed curing by CO₂ gas technology, influence of curing parameters, „green“ cured product properties and gas utilization.

The research methodology section focuses on samples and research. This section shows the composition of samples and their production description, curing conditions. Also, experimental studies have been performed, their formulas for calculation of the results were described.

The third part of the Thesis is about the results of my research. In this part the results of experiments are presented and analyzed. The results consists’ of tests on compressive strength, depth of carbonation and water absorption. Main focus is on the analysis of the results between air-cured and CO₂-cured samples (as well as how the properties of the samples change with respect to the carbonation time). The properties of cement and lime samples were further compared after curing carbonation. Charts were chosen to be used to illustrate the results; assumptions were presented in the analysis of the obtained results.

Master's Thesis is summarized in 8 conclusions.

The volume of the final work (without appendixes) is 53 pages, the work contains 48 figures, 9 tables and 30 references.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros analizė.....	14
1.1. Presuotų gaminių technologija ir panaudojimas.....	14
1.2. Presuotų gaminių savybės (poringumas, mechaninis stiprumas t.t.).....	15
1.3. Medžiagų kietinimo mechanizmas CO ₂ dujomis	17
1.4. CO ₂ dujų technologinių parametrų įtaka karbonizacijai	19
1.4.1. CO ₂ koncentracijos ir slėgio įtaka kietinimo reakcijai	19
1.4.2. Vandens ir cemento santykio įtaka kietinimo reakcijai.....	20
1.5. CO ₂ dujomis kietintų gaminių savybės ir panaudojimas.....	21
1.5.1. Stipris gniuždant.....	21
1.5.2. Vandens įgeriamumas	23
1.6. CO ₂ dujų utilizacija pramonėje gaminant statybinius gaminius	24
2. Tyrimų metodika	26
2.1. Bandinių sudėtis ir gamyba	26
2.1.1. Bandinių sudėtis	26
2.1.2. Bandinių gamyba.....	26
2.2. Kietinimo sąlygos.....	27
2.3. Eksperimentiniai tyrimai	29
2.3.1. Stiprio gniuždant nustatymas	29
2.3.2. Karbonizacijos gylio nustatymas.....	30
2.3.3. Vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas	30
3. Tyrimų rezultatai.....	33
3.1. Stipris gniuždant.....	33
3.1.1. Cementinių bandinių stipris gniuždant.....	33
3.1.2. Kalkinių bandinių stipris gniuždant.....	35
3.1.3. Cementinių ir kalkinių bandinių stiprio gniuždant palyginimas	37
3.2. Karbonizacijos gylis	38
3.2.1. Cementinių bandinių karbonizacijos gylis	38
3.2.2. Kalkinių bandinių karbonizacijos gylis	40
3.3. Vandens įgeriamumo kinetika ir bandinių poringumas.....	42
3.3.1. Cementinių bandinių įgeriamumo kinetika ir poringumas.....	42
3.3.2. Kalkinių bandinių įgeriamumo kinetika ir poringumas.....	47
Išvados	50
Literatūros sąrašas	51

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Bandinių sudėtys 1m ³ betono	26
2 lentelė. Bandinių kietinimo sąlygos	28
3 lentelė. Skirtingų sudėčių bandinių gniuždymo stiprio bandymo rezultatai, kietinant ore ir CO ₂ dujose.....	33
4 lentelė. 5 sudėties cementinių bandinių, kietintų skirtingą parų kiekį ore ir CO ₂ dujose, gniuždymo stiprio bandymo rezultatai	34
5 lentelė. Kalkinių bandinių, kietintų skirtingą parų kiekį ore ir CO ₂ dujose, gniuždymo stiprio bandymo rezultatai	35
6 lentelė. Karbonizacijos gylis	39
7 lentelė. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių įgerties kinetika ir poringumas	43
8 lentelė. 5 sudėties cementinių bandinių kietintų skirtingomis sąlygomis įgerties kinetika ir poringumas	45
9 lentelė. 7 sudėties kalkinių bandinių kietintų skirtingomis sąlygomis įgerties kinetika ir poringumas	48

Paveikslų sąrašas

1 pav. Presavimo būdo įtaka pusfabrikačio stiprumui: a- vienpusis presavimas, b-pusfabrikatis, c-dvipusis presavimas; 1,2,3 – pusfabrikačio sluoksniai [29]	14
2 pav. Vizualinis standaus betono mišinio įvertinimas [14]	14
3 pav. Vibro presavimo dedamųjų įtaka bandinio stiprumui [11]	15
4 pav. Priklausomybė tarp V/C, gniuždymo stiprio ir poringumo (32.5 MPa (a), 42.5 MPa (b), 52.5 MPa (c) – cemento klasės) [28]	16
5 pav. Priklausomybė tarp V/C, lenkimo stiprio ir poringumo (32.5 MPa (a), 42.5 MPa (b), 52.5 MPa (c) – cemento klasės [28]	17
6 pav. Betono karbonizacijos schemas: a - statinė b – dinaminė [3]	19
7 pav. CO ₂ dujų koncentracijos įtaka CO ₂ kietinimo laipsniui [24]	20
8 pav. Karbonizacijos laipsnio priklausomybė nuo sąlygų prieš kietinimą [24]	21
9 pav. Karbonizacijos kietinimo sąlygų įtaka gniuždomajam stipriui [22]	22
10 pav. Bandinių kietintų garuose ir bandinių kietintų CO ₂ aplinkoje stiprumo palyginimas [20]..	23
11 pav. Vandens įgertis po 180 dienų žiemos ore [20]	23
12 pav. Bandymo schema [6]	24
13 pav. CO ₂ dujomis kietintų gaminių GWP rodiklis. (a) bendras GWP; (b) Medžiagų GWP; (c) Gamybos GWP [6]	25
14 pav. presavimo indas	27
15 pav. Perteklinio vandens lašėjimas iš presavimo formos	27
16 pav. CO ₂ klimatinės kameros nustatymai	27
17 pav. Bandiniai CO ₂ kameroje	29
18 pav. Fenolftaleino tirpalas	30
19 pav. Skirtingų sudėčių stiprio pokytis lyginant bandinius kietintus CO ₂ aplinkoje ir ore	33
20 pav. Cementinių bandinių gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kietinimo laiko ir sąlygų ...	34
21 pav. Cementinių bandinių galutinis gniuždomasis stipris. Palyginimas tarp 28 d. ore kietinto bandinio ir tam tikrą dienų CO ₂ dujose (atitinkamos sąlygomis (žr. 2 lentelę)) kietintų gaminių ...	35
22 pav. Kalkinių bandinių gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kietinimo laiko ir sąlygų	36
23 pav. 7 ₁ bandinio suirimas	36
24 pav. 7 _{e1} bandinio suirimas	36
25 pav. Kalkinių bandinių galutinis gniuždomasis stipris. Palyginimas tarp 28 d. ore kietinto bandinio ir CO ₂ dujose (atitinkamos sąlygomis (žr. 2 lentelę)) kietintų gaminių	37
26 pav. Cementinių ir kalkinių bandinių galutinio gniuždomojo stiprio palyginimas	37
27 pav. 3' ir 3c bandinių karbonizacijos gylis	38
28 pav. 4' ir 4c bandinių karbonizacijos gylis	38
29 pav. 5' ir 5c bandinių karbonizacijos gylis	39
30 pav. 6' ir 6c karbonizacijos gylis	39
31 pav. 5 _{e1} bandinio karbonizacijos gylis	40
32 pav. 5 _{e2} bandinio karbonizacijos gylis	40
33 pav. 5 _{e3} bandinio karbonizacijos gylis	40
34 pav. 5 _{e7} bandinio karbonizacijos gylis	40
35 pav. 7 _{e1} bandinio karbonizacijos gylis	41
36 pav. 7 _{e2} bandinio karbonizacijos gylis	41
37 pav. 7 _{e3} bandinio karbonizacijos gylis	41

38 pav. 7 _{c7} bandinio karbonizacijos gylis.....	41
39 pav. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių vandens įgeriamumas pagal masę	44
40 pav. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių vandens įgeriamumas pagal tūrį	44
41 pav. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių poringumas	44
42 pav. 5 sudėties cementinių bandinių kietintų skirtingą laiką CO ₂ dujose vandens įgeriamumas pagal masę	46
43 pav. 5 sudėties cementinių bandinių kietintų skirtingą laiką CO ₂ dujose vandens įgeriamumas pagal tūrį.....	46
44 pav. 5 sudėties cementinių bandinių kietintų skirtingą laiką poringumas	47
45 pav. 7 sudėties kalkinių bandinių kietintų skirtingą laiką CO ₂ dujose vandens įgeriamumas pagal masę.....	47
46 pav. 7 sudėties kalkinių bandinių kietintų skirtingą laiką CO ₂ dujose vandens įgeriamumas pagal tūrį.....	49
47 pav. 7 sudėties kalkinių bandinių kietintų skirtingą laiką poringumas	49

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

CO₂ – anglies dioksidas;

Ca(OH)₂ – kalcio hidroksidas;

CaCO₃ – kalcio karbonatas.

Terminai:

Preconditioning - tai angliškas terminas skirtas apibūdinti sąlygas prieš bandinio kietinimą, šio tyrimo atveju tai reikštų bandinio laikymą normalaus drėgnumo ore.

pH - vandenilio jonų koncentracijos tirpale matas, parodantis tirpalo rūgštingumą ar šarmingumą.

Įvadas

Temos aktualumas

Šių dienų kontekste yra labai svarbi CO₂ išskyrimo problema. Anglies dioksido dujos sukelia šiltnamio efektą, kuris skatina klimato atšilimą. Vien cemento gamybos metu susidaro 5 % pasaulio CO₂ emisijos. O energija, skirta pastatams ir statybai bendrai sudaro 39 % visos pasaulio CO₂ emisijos (kai įtraukiama ir elektros gamyba). Pasauliui susiduriant su vis kylančiu anglies dioksido lygiu ieškomi įvairūs šios problemos sprendimai ir tai paliečia įvairias sritis: transportas, pramonė, statybos ir t. t. Mašinų gamintojai orientuojasi į elektromobilius, rinkoje pasirodo vis pažangesni jų variantai. Gamyklos yra apmokestinamos už CO₂ emisijų perviršį. Statybų sektorius yra išspaudžiamas į vis aukštesnius energetinius reikalavimus, kad pastatų eksploatavimas vis mažiau generuotų CO₂ taršos.

Taip pat šiuo metu labai svarbi tema yra žiedinė ekonomika, kuri skatina tvarų dizainą, atliekų panaudojimą bei gaminių remontą. Tarp prioritetinių žiedinės ekonomikos sektorių yra įtraukta statyba, kaip daug išteklių naudojanti sritis.

Taigi, šiame darbe bus nagrinėjamas CO₂ dujų utilizavimas kietinant presuotus gaminius, ir analizuojami gaminių savybių pasikeitimai po kietinimo.

Darbo tikslas - žaliosios technologijos būdų, pagaminti presuotus gaminius juos kietinant CO₂ dujų aplinkoje ir nustatyti jų savybes.

Darbo uždaviniai

1. išanalizuoti mokslinę literatūrą apie presuotus gaminius ir CO₂ dujų panaudojimą kietinant gaminius;
2. pagaminti skirtingų sudėčių presuotus cementinius ir kalkinius bandinius, gautus bandinius kietinti CO₂ aplinkoje ir įprastu būdu;
3. pasirinkti optimaliausią presuotų cementinių bandinių sudėtį;
4. atlikti cementinių ir kalkinių bandinių karbonizacijos tyrimus atsižvelgiant į karbonizacijos laiką;
5. nustatyti presuotų bandinių mechanines ir fizikines savybes;

Mokslinis naujumas

Betoninių gaminių kietinimas anglies dioksido dujomis nėra labai nauja tema, kalcio silikatų kietinimas CO₂ dujomis pirmą kartą publikuotas buvo 1960 m. Bet nuo to laiko tema labai stipriai progresavo, buvo padaryta daug naujų išvalgų. Vienaip ar kitaip, presuotų gaminių kietinimas CO₂ dujomis nėra plačiai išnagrinėtas ir informacijos šia tema nėra daug. Šiame darbe nagrinėjamos presuotų bandinių savybės juos kietinus „žaliuoju“ būdu ir CO₂ dujose kietinimo trukmės įtaka presuotų bandinių fizikinėms ir mechaninėms savybėms.

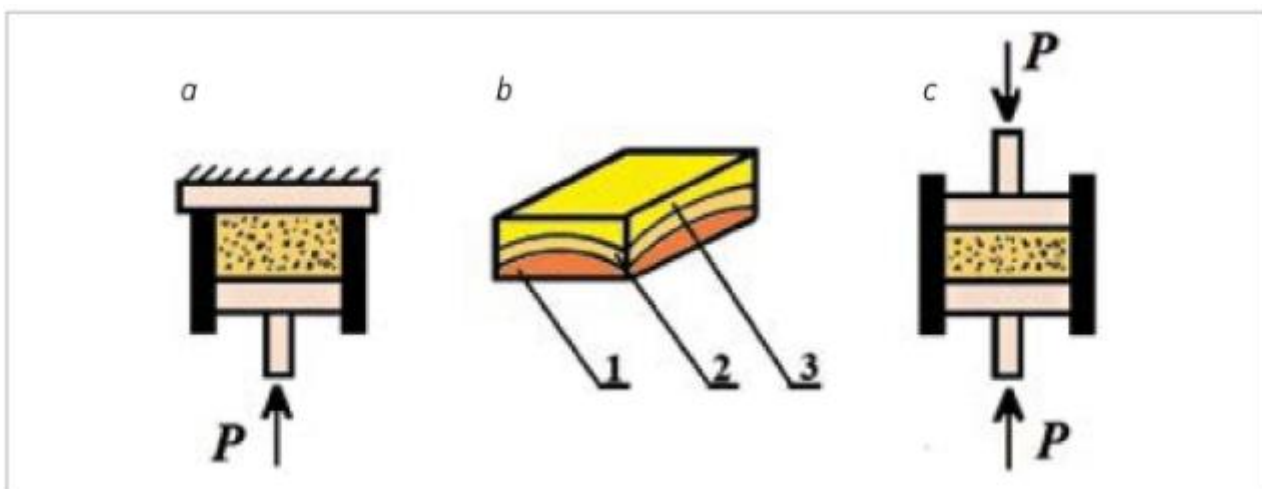
Praktinė vertė

Presuotų gaminių kietinimas CO₂ dujomis gali būti kryptingas anglies dioksido emisijos mažinimas, kuris pagerina gaminių savybes, todėl „žaliosios“ gaminių gamybos technologijos taikymas pramonėje turi tiek praktinę, tiek ekologinio tvarumo vertę.

1. Literatūros analizė

1.1. Presuotų gaminių technologija ir panaudojimas

Nepaisant to, jog presuoti gaminiai pasižymi geresnėmis mechaninio stiprumo, poringumo savybėmis, jų panaudojimo galimybės yra apribotos dėl bandinių dydžio. Bandiniai negali būti didelių gabaritų, nes norint supresuoti gaminį, presavimo slėgis turėtų būti bent 10-20 MPa. Todėl presavimo būdu kol kas gaminamos plytos, trinkelės, šaligatvių plytelės, gelžbetoniniai vamzdžiai. Gaminio stiprumas priklauso nuo mišinio drėgnumo, vienalytiškumo, aktyvumo ir plastiškumo. Presavimo metu, slėgis yra perduodamas mišiniui, didžiausią slėgį patiria mišinio sluoksniai, kurie tiesiogiai liečiasi su štampu. Gilesniuose sluoksniuose slėgis perduodamas per supresuotą mišinio sluoksnį. Tam kad tankis bandinyje būtų tolygesnis, naudojami dvipusiai presai [29].



1 pav. Presavimo būdo įtaka pusfabrikačio stiprumui: a- vienpusis presavimas, b-pusfabrikatis, c-dvipusis presavimas; 1,2,3 – pusfabrikačio sluoksniai [29]

Presuojant vienpusiu presu bandinio tankis pasiskirsto netolygiai – tankiausias prie štampo paviršiaus (1 pav. b, 1), mažiau tankus ties formos sienelėmis (1 pav. b, 2) ir mažiausiai tankus prie kontraštampo paviršiaus (1 pav. b, 3). Nors ir yra žinoma, kad [29]

Presuotiems gaminiams gaminti dažniausiai naudojami standūs betono mišiniai, kitaip tariant tai mažo drėgnumo, neslankūs betono mišiniai. [21] Standaus betono mišinio drėgnis svyruoja tarp 6 %- 8 %. Vizualiai vertinant, idealus standaus betono mišinys yra tada, kai saujoje lengvai suspaudus mišinį, betono dalelės tarpusavyje sukimba nepalikdamos likučių ant delno (2 pav.) [14].

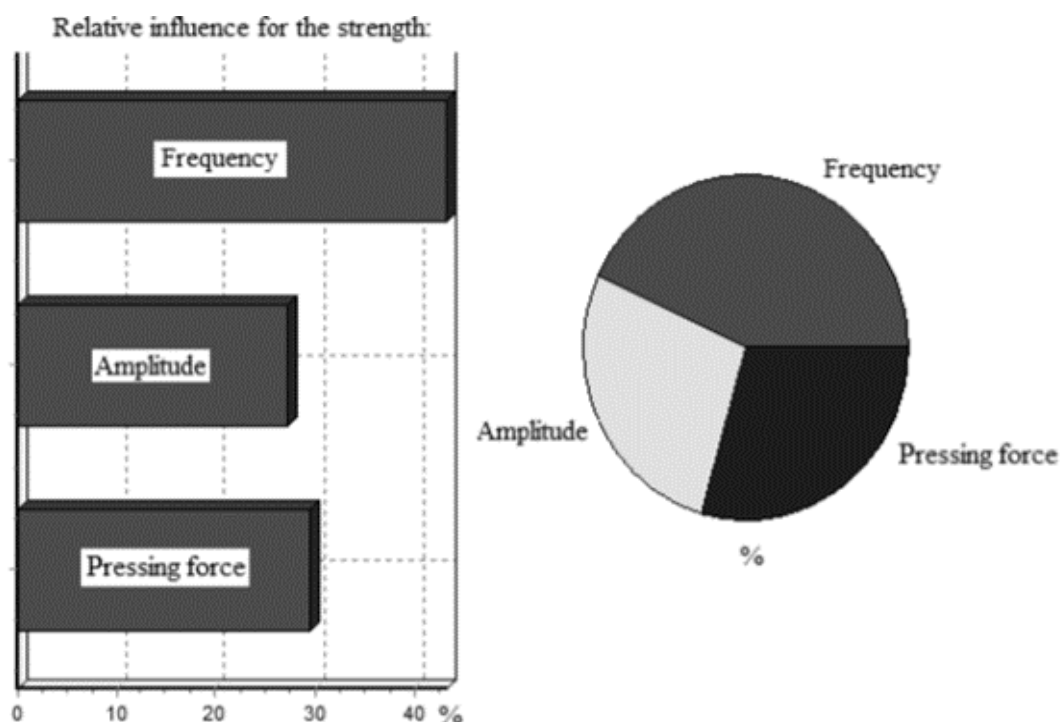


2 pav. Vizualinis standaus betono mišinio įvertinimas [14]

1.2. Presuotų gaminių savybės (poringumas, mechaninis stiprumas t.t.)

Didesnis gaminių sutankinimas užtikrina didesnę gaminių tankį bei stiprų gniuždam [11,15]. Gaminio tankiui pakitus 1 % jo stipris pakinta iki 7 %, taip pat supresavimas daro didelę įtaką gaminio atsparumui šalčiui ir vandens įgerčiai [30].

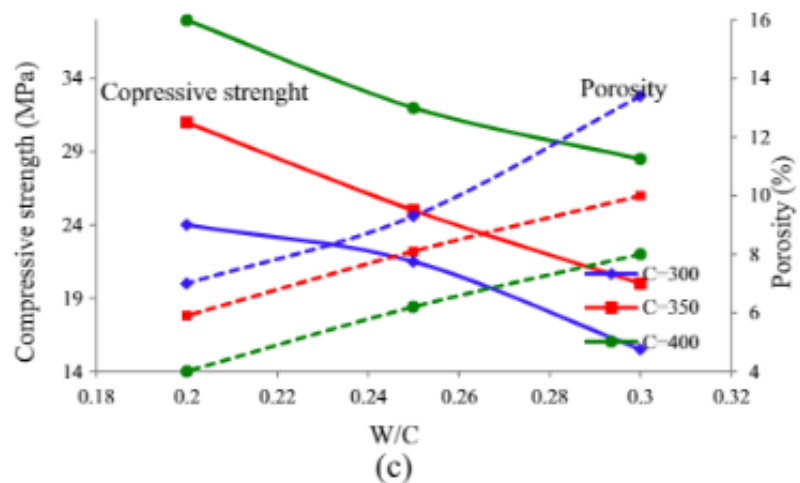
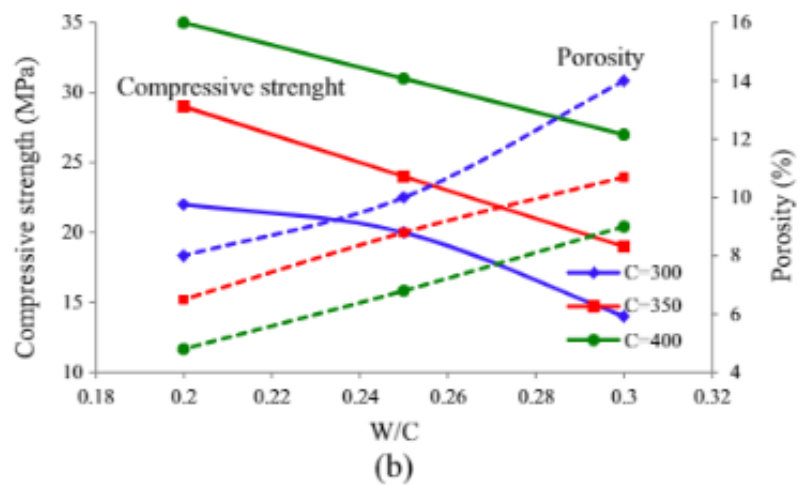
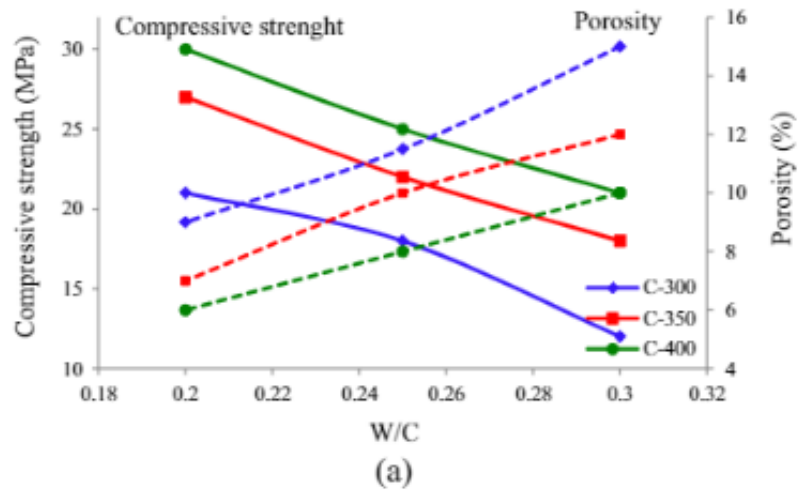
Bet sutankinimas yra įmanomas iki tam tikro gaminio tankio, dėl gaminio granulimetrinės sudėties. Atlikti eksperimentai rodo, jog presuotų gaminių stiprumas labiausiai priklauso nuo vibro preso dažnio [11].



3 pav. Vibro presavimo dedamųjų įtaka bandinio stiprumui [11]

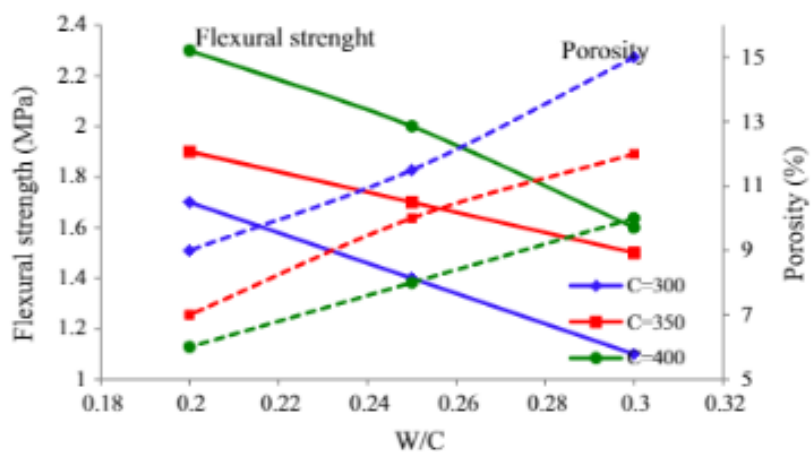
Presavimo būdų gamintiems gaminiams (plytoms, trinkelėms ir t. t.) poringumas yra svarbesnis parametras nei stipris gniuždam, nes tai daro didesnę įtaką gaminio ilgaamžiškumui ir patikimumui. Tačiau tarp poringumo ir stiprio gniuždam yra netiesioginė priklausomybė, taigi presuojant gaminių gauname mažesnę poringumą ir didesnę stiprų gniuždam [28].

Taguchi metodu gautos reikšmės, leidžia daryti išvadą, jog bandinių stiprumas gniuždam labiausiai priklauso nuo cemento kiekio kubiniame metre. Didinant V/C santyki gauname didesnę gaminio poringumą ir mažesnę stiprumą (4 pav.) Bandymo rezultatai pateikti 4 paveiksle. Punktyrinė linija žymi poringumą, ištisinė linija – stiprumą gniuždam [28].

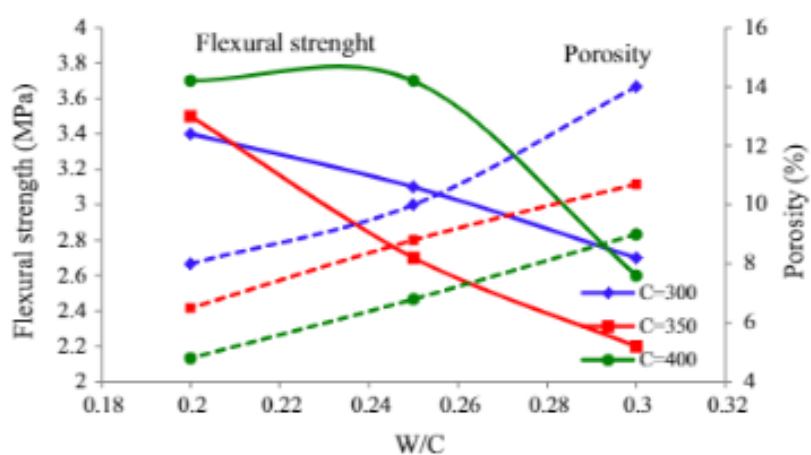


4 pav. Priklausomybė tarp V/C, gniuždymo stiprio ir poringumo (32.5 MPa (a), 42.5 MPa (b), 52.5 MPa (c) – cemento klasės) [28]

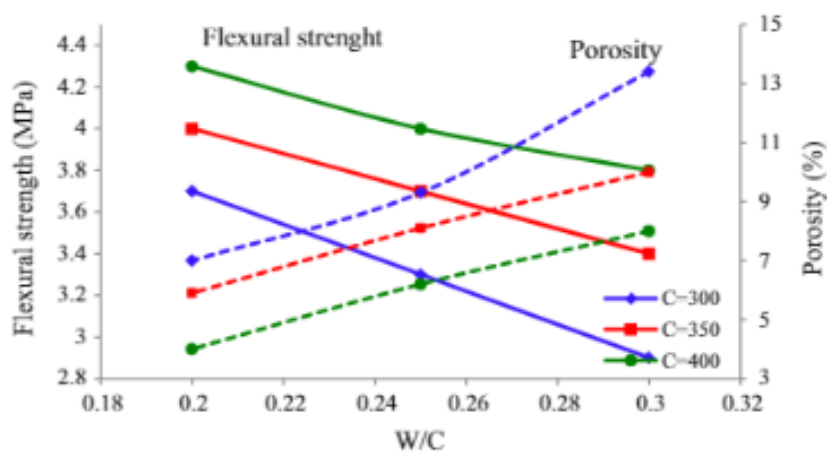
Stiprumo lenkiant bandymas buvo atliktas su tokiais pačiais bandiniais kaip ir stiprumo gniuždant bandymas. Pastebėta, jog bandinio su 42,5 MPa klasės cementu stipris lenkimui kito neįprastai (5 pav.). Bandiniai su mažesniu betono kiekiu kubui, pasiekė aukštesnę stiprumą lenkimui. Stiprumas lenkiant ir poringumas, labiausiai priklauso nuo V/C santykio [28].



(a)



(b)



(c)

5 pav. Priklausomybė tarp W/C, lenkimo stiprio ir poringumo (32.5 MPa (a), 42.5 MPa (b), 52.5 MPa (c) – cemento klasės [28]

1.3. Medžiagų kietinimo mechanizmas CO₂ dujomis

Kalcio silikato kietinimas CO₂ dujomis nebuvo publikuotas iki 1960 metų, vėliau publikuoti tyrimai nurodė, kad norint pasiekti efektyvų kietinimą CO₂ dujomis, mišinio vandens ir rišiklio santykis turi

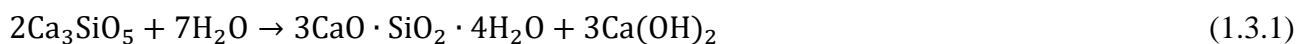
būti labai žemas. Visgi maždaug 2008 metais pasirodė pirmosios publikacijos, kuriose nurodyta, jog gaminiai su normaliu vandens ir rišiklio santykiu gali būti efektyviai kietinami CO₂ dujomis, jei gaminiai buvo tinkamai paruošti ir laikyti tam tikrą laiką sausoje aplinkoje po to, kai buvo išimti iš betonavimo formos [5,19].

Betono kietėjimo karbonizacija yra procesas, kai betono kietėjimas pagreitinamas įleidus CO₂ dujas į betono kietėjimo talpą ir dujom reaguojant su kalcio hidroksidu (Ca(OH)₂) susidaro kalcio karbonatas (CaCO₃). Cemento ir CO₂ reakcija yra tiksliau apibūdinama kaip kalcio silikatų C₂S ir C₃S reakcija su CO₂ ir vandeniu [9,18,25,27].

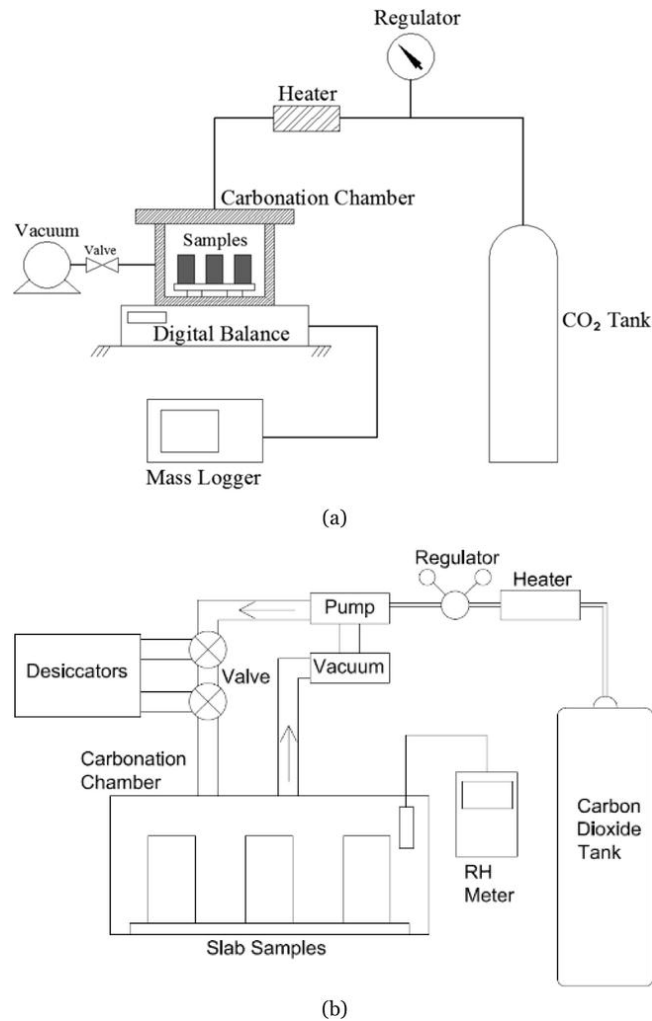
Karbonizacija yra skirstoma į pasyvią (atmosferinę karbonizaciją) ir aktyvią (pagreitintą kietinimo karbonizaciją). Atmosferinė karbonizacija vyksta lėtai, jos minusas tas, kad jau sukėtėjusių betono gaminių pH mažėja toliau absorbuojant CO₂, dėl to susiduriame su armatūros rūdijimu ir įtrūkimais betone [2,8,17].

Kietinimas CO₂ dujomis tai cheminis procesas, kai betonas kietėja CO₂ reaguojant su mineraliais cementiniame akmenyje. Šis procesas yra egzoterminis [16]. Įdėjus gaminį į indą su CO₂ dujomis, reakcija pradeda vykti išoriniuose sluoksniuose, todėl tolimesnė CO₂ dujų difuzija vyksta vis sunkiau, nes vykstant reakcijai, gaminio sluoksniai tampa vis tankesni ir mažiau poringi ir dujoms tampa vis sudėtingiau prasiskverbti pro betono sluoksnius [1,7,19].

Karbonizacijos reakcija cementiniuose gaminiuose:



Kai bandinys yra įdėtas į sandarią kamerą, į kamera aukštu slėgiu pradedama leisti CO₂ dujas (500 kPa). Kol bandiniai absorbuoja anglies dioksidą, kameroje dujų koncentracija ir slėgis krenta. Po numatyto laiko, dujos iš kameros išleidžiamos ir įleidžiamos dar kartą pakartotiniam ciklui. Atsižvelgiant į dujų slėgio ir koncentracijos sumažėjimą kiekviename cikle, galima daryti išvadas apie CO₂ pasisavinimą. Procesą galime laikyti baigtu, kai dujų koncentracija ir slėgis nebekinta, tai indikuoja, jog reakcija jau pasibaigė. Reakcijos laikas ir efektyvumas priklauso nuo CO₂ dujų koncentracijos [10].



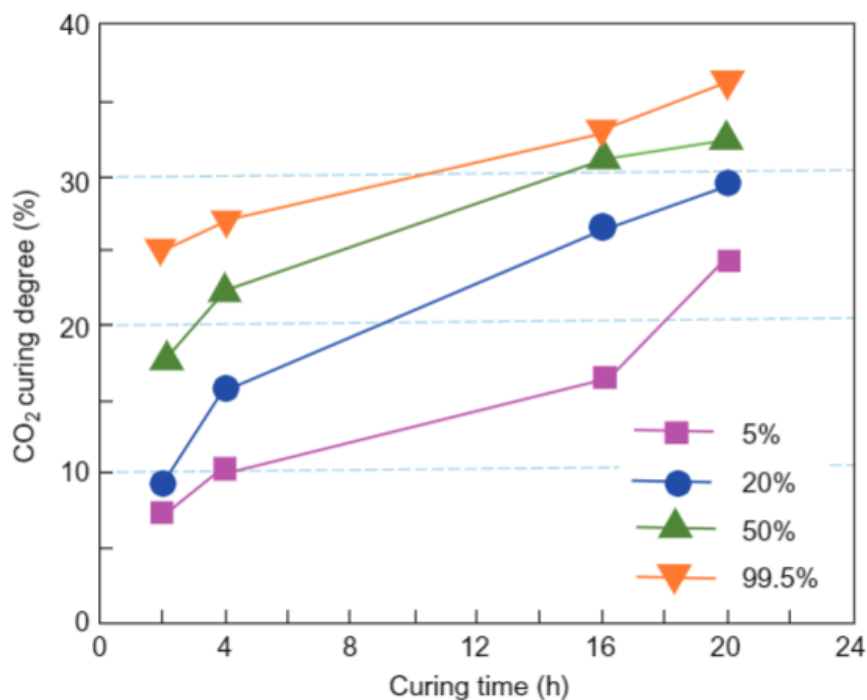
6 pav. Betono karbonizacijos schemas: a - statinė b – dinaminė [3]

Dažniausiai betono kietinimas CO₂ dujomis yra atliekama statinės karbonizacijos sistemos būdu. Šioje karbonizacijos schemoje yra naudojama uždara sistema, kai susidaręs vanduo išgaruoja nuo egzoterminės reakcijos yra įtraukiamas į karbonizacijos laipsnio vertinimą. Kitas šios sistemos minusas, jog reakcijai trukdo nusėdusios kalcio karbonato dalelės laisvame porėtame paviršiuje, dėl to sumažėja poringumas ir sulėtėja CO₂ dujų difuzija. Norint išvengti šių reakcijos trikdžių, buvo sukurta dinaminė karbonizacijos sistema. Ši sistema pašalina laisvą paviršinį vandenį kontroliuojamoje aplinkoje. Taip pat padidino CO₂ dujų įsiskverbimą, sukurdamą kapiliarų „kelių“ visame bandinyje [3].

1.4. CO₂ dujų technologinių parametru įtaka karbonizacijai

1.4.1. CO₂ koncentracijos ir slėgio įtaka kietinimo reakcijai

Betono kietinimo karbonizacijos procese anglies dioksido dujų koncentracija ir slėgis yra svarbiausi veiksniai, darantys įtaką reakcijai ir CO₂ dujų difuzijai. Šie veiksniai tiesiogiai veikia gaminio stiprumą ir karbonizacijos laipsnį. Didesnė CO₂ dujų koncentracija užtikrina greitesnę CO₂ dujų įsiskverbimą į gaminį, taip pat padidina CO₂ dujų tirpumą, tai paveikia Ca²⁺ jonų tirpimą iš cemento fazių, formuojant kapiliarines poras, tai vėliau daro įtaką karbonizacijos produktų susidarymui. Kalcito susidarymas bandiniuose taip pat didėja didėjant dujų koncentracijai, dėl to gaminys tampa tankesnis [4,24].



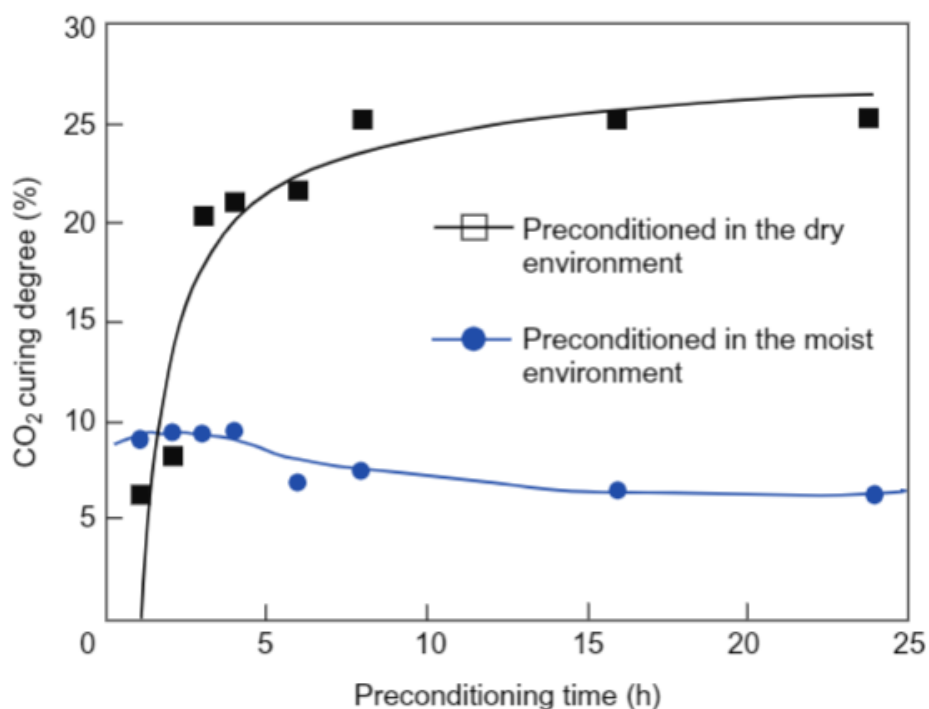
7 pav. CO₂ dujų koncentracijos įtaka CO₂ kietinimo laipsniui [24]

CO₂ dujų slėgio įtaka panaši kaip ir koncentracijos, didinant slėgį kietėjimo karbonizacija greitėja ir pasiekia gilesnius sluoksnius. Bet kai slėgis viršija 0,6 MPa gniuždymo stipris ir karbonizacijos laipsnis reikšmingai nebesikeičia. Tačiau padidinus CO₂ dujų slėgį gaunami stambesni karbonizacijos produktai (10 μm), kurie vertinami kaip mažiau homogeniški ir silpniau susirišantys nei smulkesni kristalai (<1 μm) susiformavę ties 0,1 MPa dujų slėgiu [23,24].

Xuemiao Li ir Tung-Chai Ling moksliniame darbe tai pat aprašė CO₂ dujų koncentracijos įtaką CaCO₃ kristalų susidarymui. Šiuo atveju buvo nagrinėjami standaus mišinio presuoti gaminiai. Didinant CO₂ koncentraciją turime tokių patį kristalų reiškinį kaip ir didinant slėgį. Didinant dujų koncentraciją, kristalai formuojasi didesni. Taip pat pastebėta, kad bandinių mikrostruktūra visiškai skiriasi (dėl hidratacijos produktų ir C-S-H gelio transformacijų) lyginant, kurie buvo kietinami mažesnėje nei 3 % koncentracijoje ir tų, kurie buvo kietinami aukštesnėje nei 10 %. Kai dujų koncentracija yra 15–100 % (atsižvelgiant į rišiklį) Kalcio hidroksidas (CH) gali pilnai karbonizuotis [12].

1.4.2. Vandens ir cemento santykio įtaka kietinimo reakcijai

Vandens ir cemento santykis yra labai svarbus veiksnys betono kietėjimo karbonizacijai. Nustatyta, jog optimaliausias V/C santykis yra 0,125. Didesnis vandens kiekis būtų neefektyvus, nes laisvas gaminio poras blokuotų vandeniu, taip trukdydamas CO₂ dujų įsiskverbimui. Kadangi 0,125 V/C santykis yra labai mažas, dėl to tokių mišinį sunku paruošti ir pritaikyti. Įprastai V/C santykis svyruoja 0,35–0,6, siekiant užtikrinti mišinio išmaišymą ir klojamumą. Tam, kad efektyviai galėtume kietinti betoną su aukštesniu V/C santykiu reikia bandinius pradėti kietinti sausoje aplinkoje prieš dedant į CO₂ kamerą. Kitaip sakant, sąlygos prieš kietinimą (angl. *preconditioning*) turi didelę įtaką karbonizacijos laipsniui, kadangi jų metu dalis vandens yra išgarinama iš porų [13,24,26].

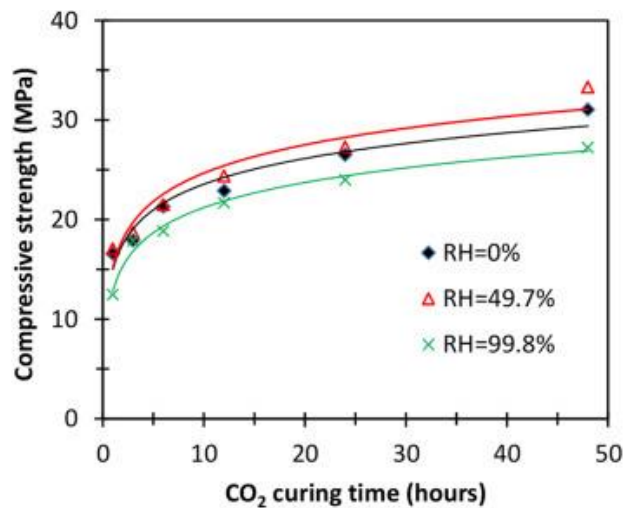


8 pav. Karbonizacijos laipsnio priklausomybė nuo sąlygų prieš kietinimą [24]

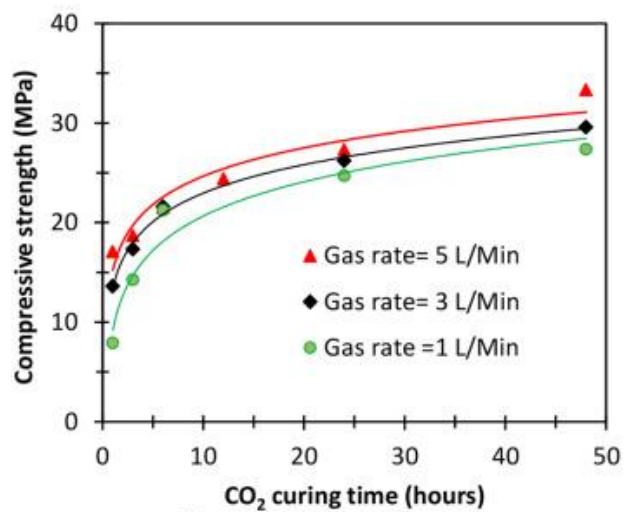
1.5. CO₂ dujomis kietintų gaminių savybės ir panaudojimas

1.5.1. Stipris gniuždant

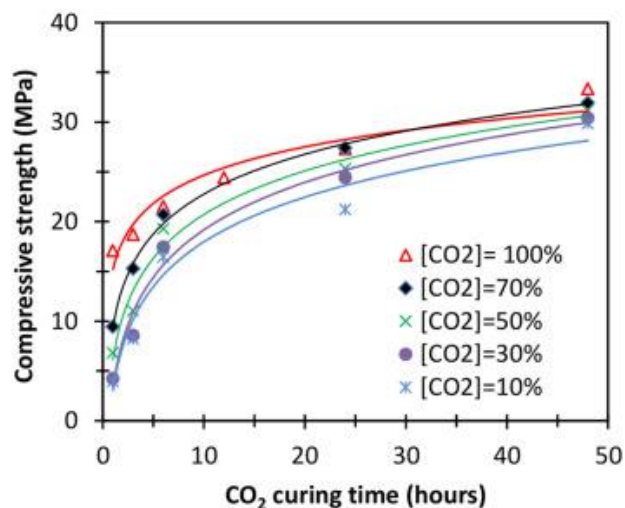
Bandinių kietintų CO₂ aplinkoje stipris gniuždant varijuoja atsižvelgiant į kietinimo sąlygas (santykinės drėgmės, CO₂ dujų srauto ir CO₂ koncentracijos). Bandiniai, kurie buvo kietinti prie 5 L/min dujų srautui bei 100 % CO₂ koncentracijai, aukščiausią gniuždomojo stiprio vertę įgijo esant 49,7 % drėgnumui. Kai santykinė drėgmė buvo 99,8 %, bandinių gniuždomojo stiprio vertė reikšmingai sumažėjo. Toks reiškinys pastebimas todėl, kad reakcija tarp CO₂ ir cemento komponentų prasideda CO₂ dujoms tirpstant vandenyje, bet kai vandens kiekis yra per didelis, CO₂ difuzija slopinama ir mažėja reakcijos greitis [22].



(a) Relative humidity



(b) Flow-through gas rate

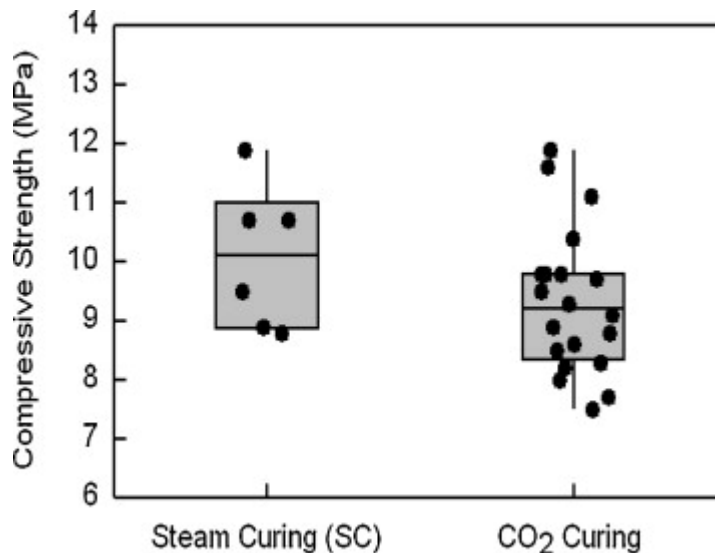


(c) CO₂ concentration

9 pav. Karbonizacijos kietinimo sąlygų įtaka gniuždomajam stipriui [22]

Karbonizacijos būdu kietinant presuotus gaminius, pastebėta, jog gaminius ankstyvoje kietėjimo stadijoje patalpinus į CO₂ kamerą per 2 valandas gaminys gali pasiekti 82 % stiprumo, kurį pasiekia 24 valandas kietinant vandenyje [12].

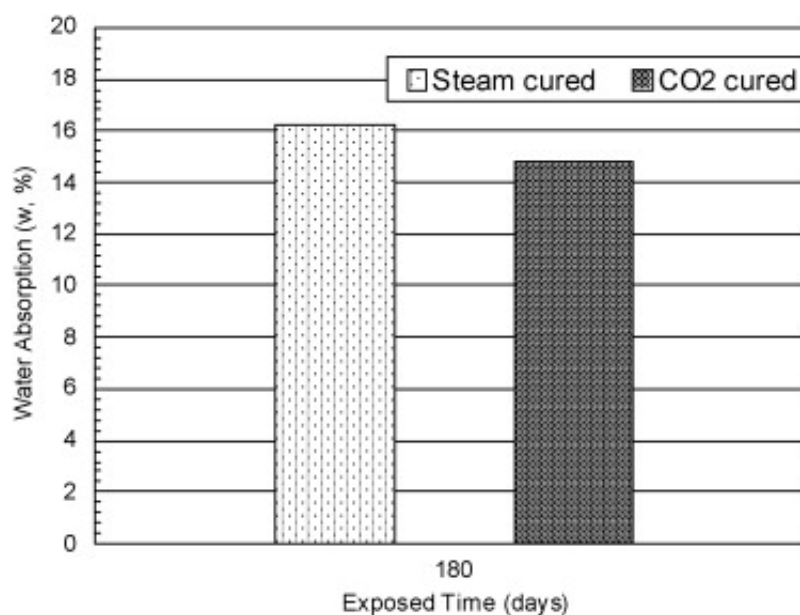
Caijun Shia, Dehui Wang, Fuqiang He, Meng Liu straipsnyje aprašo lengvojo betono kietinto CO₂ aplinkoje ir vandens garų aplinkoje mechaninių savybių palyginimą po lauko atmosferos sąlygų poveikio (120, 150, 180 dienų). Gauti rezultatai (prieš lauko aplinkos poveikį) rodo, jog stiprumo skirtumo beveik nėra, tarp vandens garuose kietintų ir CO₂ aplinkoje kietintų bandinių. Tačiau stiprumo reikšmės labiau svyravo CO₂ dujose kietintų bandinių (10 pav.) galimai dėl CO₂ kietinimo sąlygų [20].



10 pav. Bandinių kietintų garuose ir bandinių kietintų CO₂ aplinkoje stiprumo palyginimas [20]

1.5.2. Vandens įgeriamumas

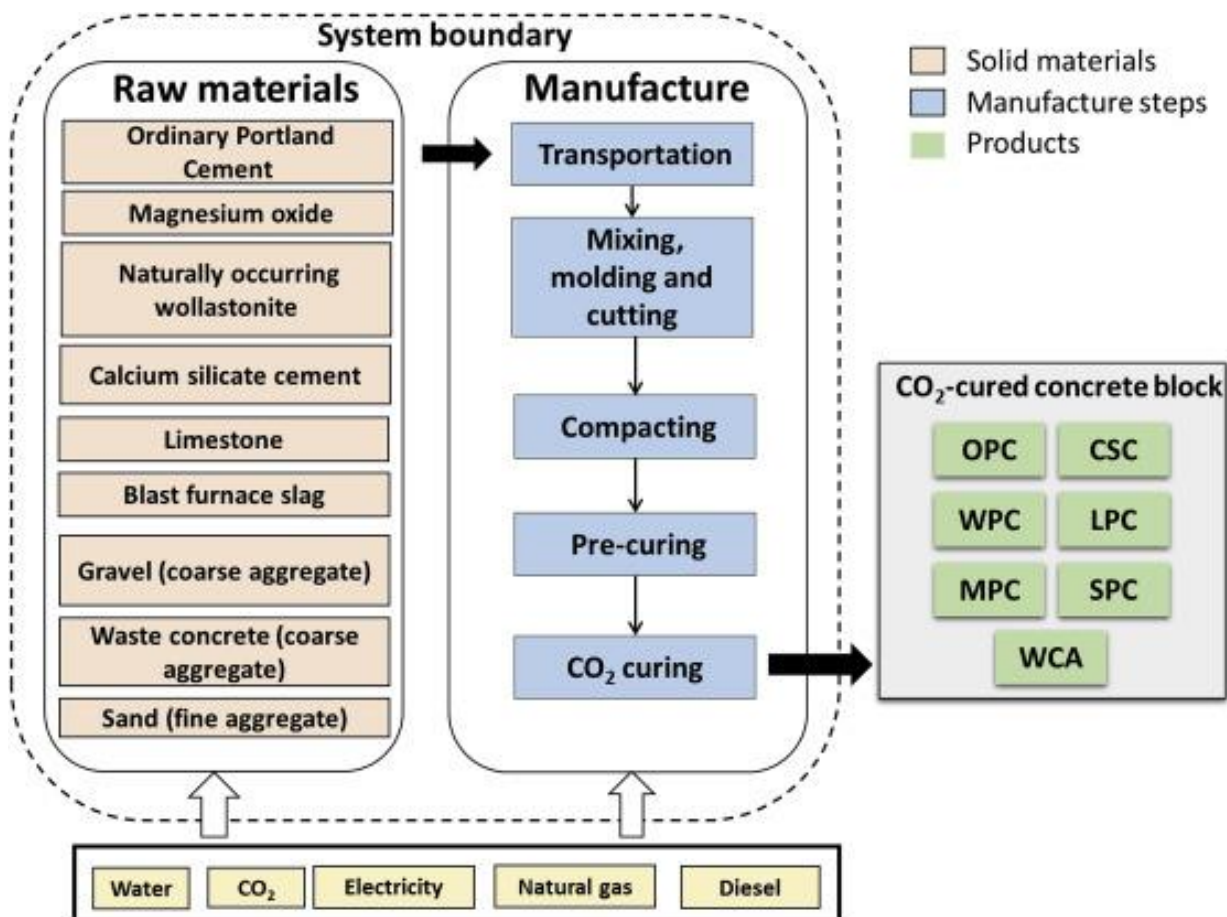
Karbonizacijos būdu kietinant gaminius susidaro net iki 75 % stabilus kalcio karbonato. Kalcio karbonatas gerai kristalizuojasi ir yra stabilus struktūriškai. Būtent dėl šių priežasčių CO₂ aplinkoje kietinti gaminiai rodo geresnius rezultatus vandens įgeriamumo bandymuose [20].



11 pav. Vandens įgertis po 180 dienų žiemos ore [20]

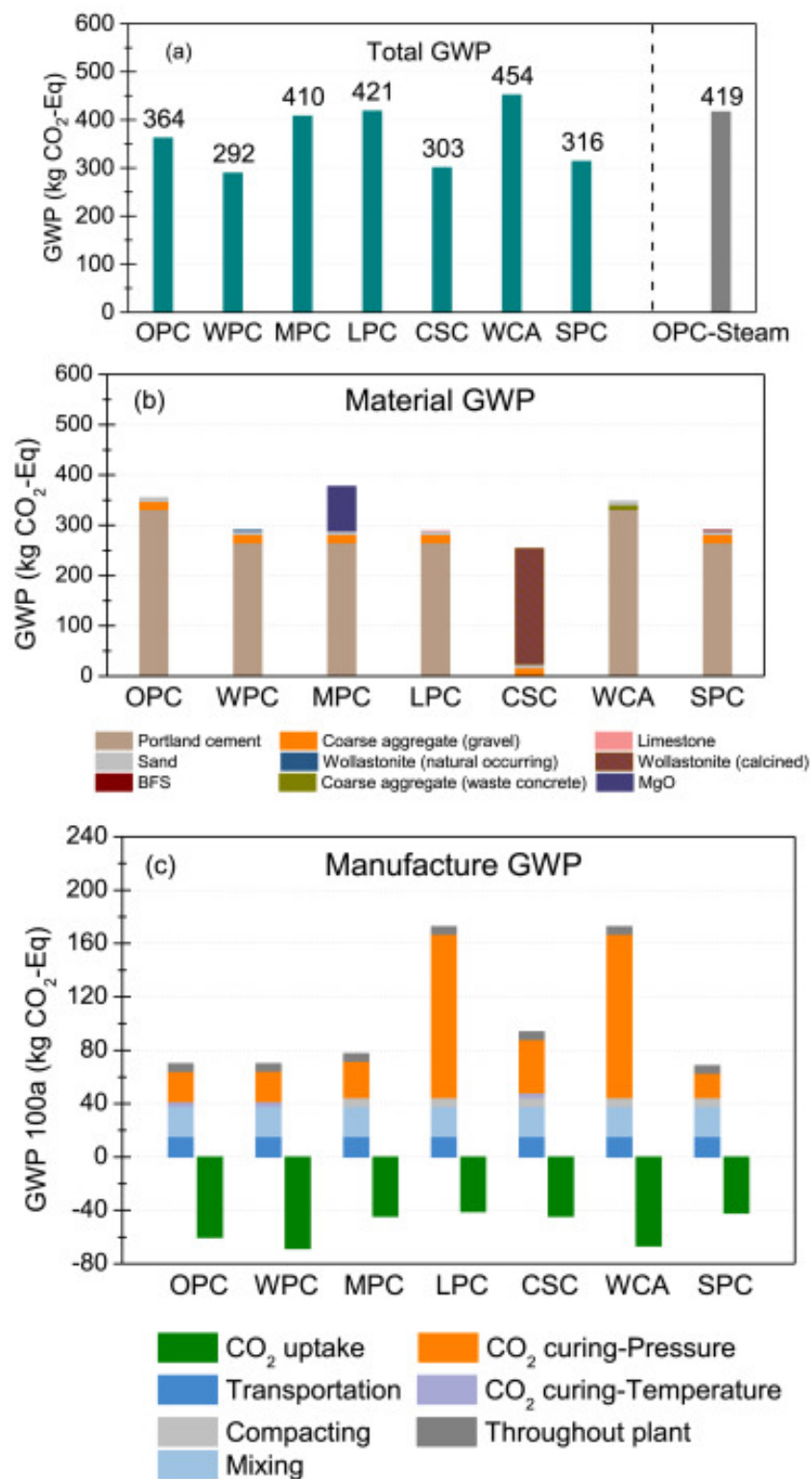
1.6. CO₂ dujų utilizacija pramonėje gaminant statybinius gaminius

Žurnale „Cleaner Production“ straipsnyje analizuojamas CO₂ dujų perdirbimo potencialas ir poveikis aplinkai kietinant betoną karbonizacijos būdu CO₂ dujomis. Bandyme analizuojami septynių sudėčių bandiniai: įprasti Portlandcemenčio (OPC), Wollastonite-Portlandcemenčio (WPC), MgO-Portlandcemenčio (MPC), Klinčių-Portlandcemenčio (LPC), Šlakinio Portlandcemenčio (SPC), Kalcio silikato cemento (CSC) ir bandiniai su atliekų užpildais (WCA).



12 pav. Bandymo schema [6]

Bandymo rezultatų grafike (13 pav. (a)) vaizduojama visų bandinių GWP (įtaka pasauliniam klimato atšilimui) vertės, palyginimui naudojant įprastą portlandcemenčio garais kietintą gaminį (OPC-Steam). Matome, kad kietinant karbonizacijos būdu portlandcemenčio gaminį galime sumažinti GWP rodiklį 13,1 %. WPC bandinio GWP rodiklis net 30,3 % mažesnis nei įprasto OPC-Steam. LPC ir WCA bandinių GWP vertės gautos didesnės nei (OPC-Steam) [6].



13 pav. CO₂ dujomis kietintų gaminių GWP rodiklis. (a) bendras GWP; (b) Medžiagų GWP; (c) Gamybos GWP [6]

2. Tyrimų metodika

Tyrimai buvo atlikti su cementiniais ir kalkiniais bandiniais. Iš viso buvo suformuoti 48 bandiniai, naudotos 6 skirtingos sudėtys. Atlikus bandymus, buvo pasirinktos optimaliausios sudėtys, su kuriomis buvo tęsiamas tolimesnis tyrimas.

2.1. Bandinių sudėtis ir gamyba

2.1.1. Bandinių sudėtis

Bandiniai buvo gaminami 6 skirtingų sudėčių. Pirmoji sudėtis buvo atmesta, dėl per didelio vandens kiekio ir sekančiose sudėtyse vandens kiekis buvo sumažintas nuo 10 % iki 8 %. Per didelis vandens kiekis buvo pastebėtas kai presuojant gaminį iš preso formos pradėjo lašėti perteklinis vanduo. Sekančios sudėtys tarpusavyje turėjo esminį skirtumą – užpildo frakciją. Bandiniai buvo gaminti su: 0/1, 0/2, 0/4 ir individualia frakcija. Parinktą frakciją sudarė 15 % smulkausio užpildo (0/1 frakcijos), 55 % vidutinio užpildo (1/2 frakcijos) ir 30 % stambiausio užpildo (2/4 frakcijos). Atsižvelgiant į gautus bandymų rezultatus buvo atrinkta optimali sudėtis ir tolimesni bandymai tiek cementinių, tiek kalkinių bandinių buvo atlikti su 0/4 frakcijos smėliu.

1 lentelė. Bandinių sudėtys 1m³ betono

Sudėties nr.	Riškis, kg.	Rišiklio tipas	Užpildas, kg.	Užpildo frakcija	Vanduo, l.	Vanduo, %
1 ir 2	224,80	Cementas	1798.43	0/2	60 (10%)	10
3	224,80	Cementas	492	0/1	48 (8%)	8
4	224,80	Cementas	492	Parinkta sudėtis: 0/1 fr.-15 %; 1/2 fr.-55 %; 2/4 fr.-30 %.	48 (8%)	8
5	224,80	Cementas	492	0/4	48 (8%)	8
6	224,80	Cementas	492	0/2	48 (8%)	8
7	224,80	Kalkės	492	0/4	48 (8%)	8

2.1.2. Bandinių gamyba

Dėl turimo presavimo indo (14 pav.), bandinių forma buvo apribota. Visų bandinių skersmuo yra 100,34 mm, o aukštis varijuoja nuo 33 mm iki 36 mm. Taip pat dėl to, jog bandinių gaminimui buvo naudojama presavimo technologija, kiekvienas bandinys buvo gaminamas individualiai todėl, kad vienu metu buvo galima presuoti tik vieną bandinį. Bandinio presavimas buvo atliekamas tolygiai, naudojantis presu, kontraštampos buvo lėtai apkraunamas (15 kN/min greičiu) iki 5 MPa, tuomet apkrovimo greitis padidinamas iki 1 kN/s ir presuojama iki 300 MPa, tuomet programa išjungiamą ir bandinys išimamas iš formos.



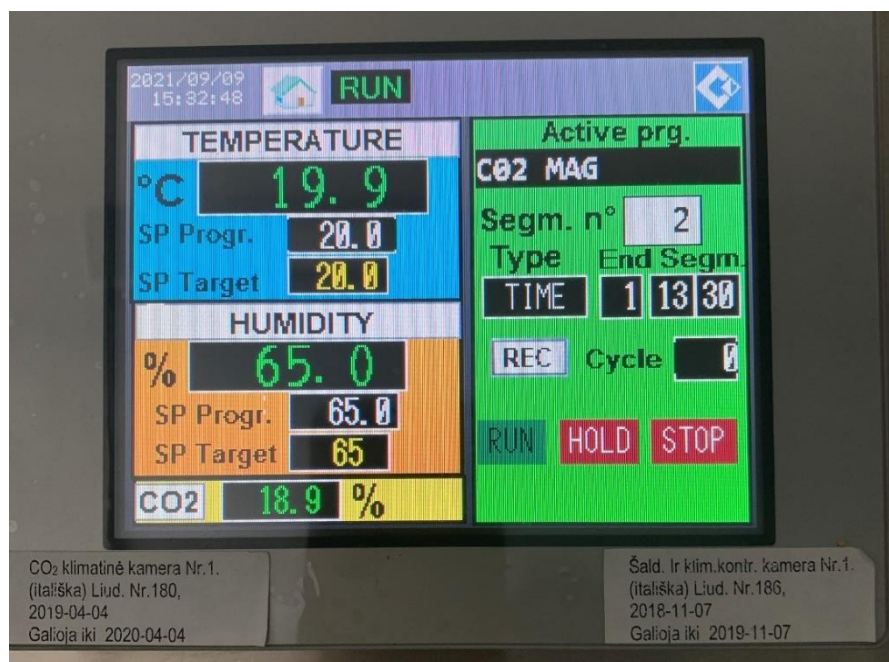
14 pav. presavimo indas



15 pav. Perteklinio vandens lašėjimas iš presavimo formos

2.2. Kietinimo sąlygos

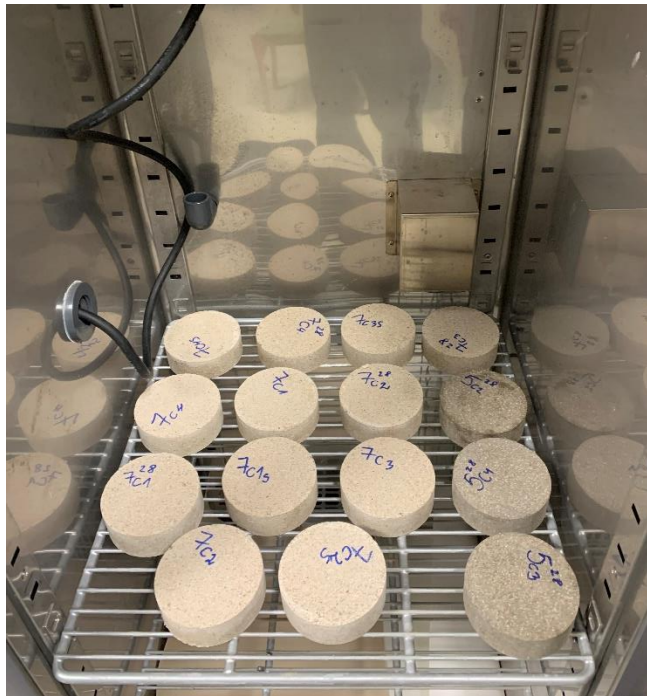
Bandiniai buvo kietinami ore ir CO₂ dujų aplinkoje. Kietinimas CO₂ dujose buvo atliktas sandarioje kameroje. Norint įvertinti bandinių stiprio bei karbonizacijos pokyčius nuo laiko bandiniai kameroje buvo laikomi atitinkamą laiką (žr. 2 lentelę). Anglies dioksido kameroje buvo užtikrintos pastovios sąlygos, 20 % dujų koncentracija, 65 % drėgmė ir 20 °C temperatūra. Prieš dedant bandinius į CO₂ kamerą, visi bandiniai buvo laikomi 24 valandas normalios drėgmės sąlygomis ore, toliau darbe tai bus vadinama – „preconditioning“, tai buvo atliekama tam, kad iš gaminio porų išgaruotų vanduo ir CO₂ dujos būtų lengviau patekti į bandinį.



16 pav. CO₂ klimatinės kameros nustatymai

2 lentelė. Bandinių kietinimo sąlygos

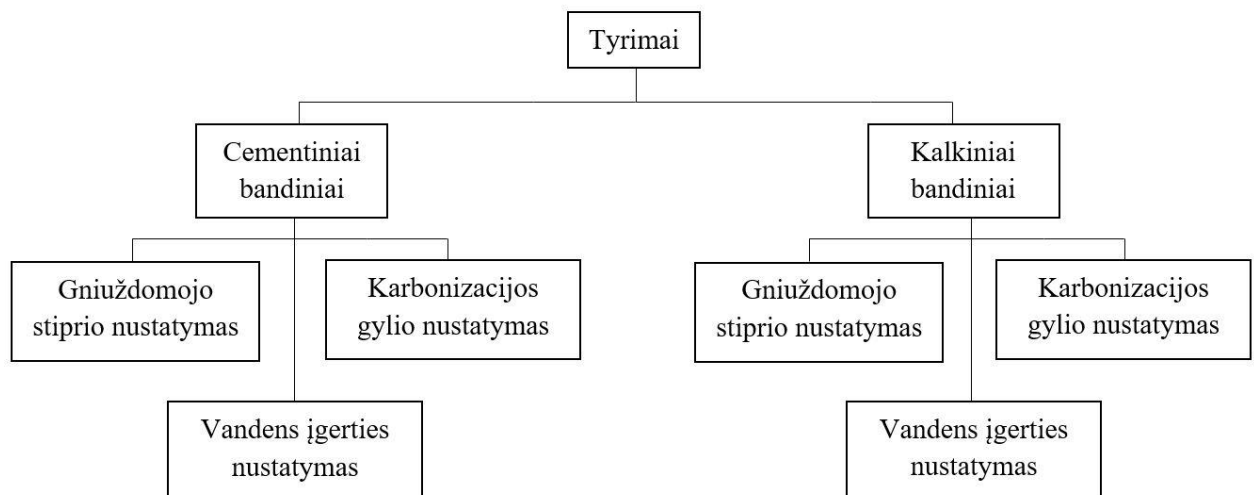
Bandinio nr.	Kietinimo būdas	Bandinių kiekis, vnt.
1'	28 d. ore	1
2'	28 d. ore	1
3c	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 27 d. CO ₂ dujų aplinkoje	2
3'	28 d. ore	2
4c	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 27 d. CO ₂ dujų aplinkoje	2
4'	28 d. ore	2
5c	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 27 d. CO ₂ dujų aplinkoje	2
5'	28 d. ore	2
6c	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 27 d. CO ₂ dujų aplinkoje	2
6'	28 d. ore	2
5' ₁	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 24 h kietinimas ore	1
5' ₂	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 48 h kietinimas ore	1
5' ₃	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 72 h kietinimas ore	1
5' ₇	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 7 d. kietinimas ore	1
5c ₁	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 24 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	2
5c ₂	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 48 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	2
5c ₃	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 72 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	2
5c ₇	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 7 d kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	2
5c ₁ ²⁸	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 24 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje + likusį laiką iki 28 parų kietinimas ore	1
5c ₂ ²⁸	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 48 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje + likusį laiką iki 28 parų kietinimas ore	1
5c ₃ ²⁸	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 72 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje + likusį laiką iki 28 parų kietinimas ore	1
5c ₇ ²⁸	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 7 d kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje + likusį laiką iki 28 parų kietinimas ore	1
7' ₁	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 24 h kietinimas ore	1
7'	28 d. ore	1
7c ₁	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 24 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	2
7c ₂	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 48 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	2
7c ₃	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 72 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	2
7c ₇	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 7 d kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	2
7c ₁ ²⁸	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 24 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje + likusį laiką iki 28 parų kietinimas ore	1
7c ₂ ²⁸	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 48 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje + likusį laiką iki 28 parų kietinimas ore	1
7c ₃ ²⁸	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 72 h kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	1
7c ₇ ²⁸	24 h ore (<i>preconditioning</i>) + 7 d kietinimas CO ₂ dujų aplinkoje	1



17 pav. Bandiniai CO₂ kameroje

2.3. Eksperimentiniai tyrimai

Pirminiai tyrimai buvo atlikti optimaliai sudėčiai pasirinkti. Optimali sudėtis buvo atrinkta pagal didžiausią gniuždomojo stiprio pokytį po 28 dienų kietinimo. Visų bandinių tyrimai buvo atlikti pagal toliau pateikiamą schemą:



2.3.1. Stiprio gniuždant nustatymas

Kadangi literatūros šaltiniuose teigiama, jog CO₂ aplinkoje kietinami gaminiai tankėja ir kalcio silikatams reaguojant su anglies dioksido dujomis susiformuoja stabilūs kalcio karbonato kristalai, taip gaminio stipris didėja. Todėl stiprio gniuždant bandymai atliekami visiems bandiniams, nurodytiems 2 lentelėje. Stipris gniuždant nustatomas naudojantis presu, bandiniai statomi tiksliai ant apatinio padėklo vidurio, kad bandiniai būtų gniuždomi centriškai. Po kiekvieno bandymo, preso

padėklai yra nuvalomi, kad gniuždant naują bandinį, likę bandinio likučiai nesukoncentruotų jėgų netolygiai.

2.3.2. Karbonizacijos gylio nustatymas

Karbonizacijos gylis yra vienas svarbiausių rodiklių norint nagrinėti bandinių kietinimą CO₂ aplinkoje. Įsivertinę karbonizacijos gylį galime lyginti ore kietintų ir CO₂ dujose kietintų gaminių karbonizaciją. Karbonizacijos gylis nustatomas skeliant bandinius per puse. Kalcio hidroksidui identifikuoti naudojamas fenolftaleinas. Fenolftaleino tirpalas reaguodamas su rūgštimis ir neutraliais junginiais yra bespalvis, o reaguodamas su šarmais nusidažo avietine spalva. Kalcio hidroksidas (Ca(OH)₂) – tai šarminis junginys, užpurškus fenolftaleino tirpalo ant praskelto bandinio, dar nesureagavęs kalcio hidroksidas nusidažo avietine spalva, o karbonizacijos produktas – kalcio karbonatas (CaCO₃) lieka bespalvis. Tokiu eksperimentiniu būdu indikuojamas karbonizacijos gylis bandinyje.



18 pav. Fenolftaleino tirpalas

2.3.3. Vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas

Remiantis šaltiniais, CO₂ aplinkoje kietinti betoniniai gaminiai tampa tankesni, todėl buvo daroma prielaida, jog šių bandinių vandens įgertis turėtų būti mažesnė. Vandens įgertis taip pat yra svarbi savybė presuotiems gaminiams, nes daugelis jų yra naudojami lauko sąlygomis (trinkelės, plytos, apdailos plokštės t. t.). Taip pat sudarius vandens įgeriamumo kinetiką, galima suskaičiuoti bandinio poringumą.

1. Pirmiausia bandiniai išdžiovinami krosnyje 105 °C temperatūroje.
2. Atvėšę iki kambario temperatūros išdžiovinti bandiniai pasveriami.
3. Bandiniai pamerkami į vandenį.
4. Bandiniai ištraukiami iš vandens (po 15 min, po 1 h, po 24 h), nusausinami sudrėkintu skuduru ir pasveriami.
5. Pilnai prisotinti bandiniai (po 48 h mirkimo vandenyje) nusausinami sudrėkintu skuduru ir pamerkti vandenyje.

6. Svėrimų rezultatai užrašomi.

7. Atliekami skaičiavimai.

Vandens įgėris pagal masę:

$$W_p = \frac{m_{48} - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (2.3.3.1)$$

čia:

m_{48} – bandinio masė po 48 h mirkimo vandenyje;

m_s – sauso bandinio masė.

Tankis:

$$\rho = \frac{m_s}{m_{48} - m_v} \cdot 1000 \quad (2.3.3.2)$$

čia:

m_{48} – bandinio masė po 48 h mirkimo vandenyje;

m_v – bandinio masė vandenyje po 48 h mirkimo vandenyje;

m_s – sauso bandinio masė.

Vandens įgėris pagal tūrį:

$$W_{p(t)} = (W_p \cdot \rho) / 1000 \quad (2.3.3.3)$$

Vandens įgeris po 15 min:

$$W_1 = \frac{m_{15} - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (2.3.3.4)$$

čia:

m_{15} – bandinio masė po 15min mirkimo vandenyje;

m_s – sauso bandinio masė.

Vandens įgeris po 60 min:

$$W_2 = \frac{m_{60} - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (2.3.3.5)$$

čia:

m_{60} – bandinio masė po 60 min mirkimo vandenyje;

m_s – sauso bandinio masė.

Vandens įgeris po 24 h:

$$W_2 = \frac{24 - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (2.3.3.6)$$

čia:

m_{24} – bandinio masė po 24 h mirkimo vandenyje;

m_s – sauso bandinio masė.

Santykiai:

$$W_{1(s)} = \frac{W_1}{W_p} \quad (2.3.3.7)$$

$$W_{2(s)} = \frac{W_2}{W_p} \quad (2.3.3.8)$$

Bendras poringumas:

$$P_p = \left(1 - \left(\frac{\rho}{2609}\right)\right) \cdot 100\% \quad (2.3.3.9)$$

Atviras poringumas:

$$P_a = W_{p(t)} \quad (2.3.3.10)$$

Uždaras poringumas:

$$P_u = P_p - P_a \quad (2.3.3.11)$$

3. Tyrimų rezultatai

3.1. Stipris gniuždant

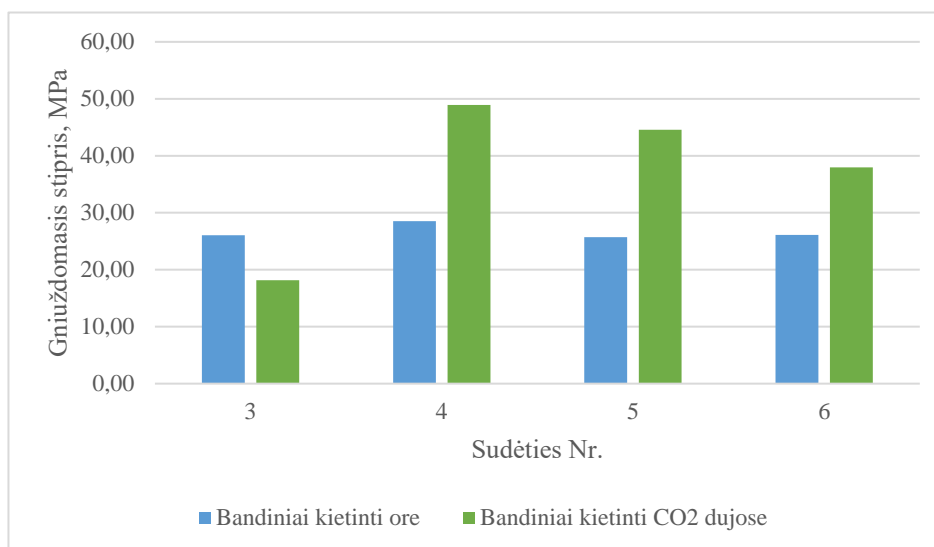
3.1.1. Cementinių bandinių stipris gniuždant

Pirmiausia stiprio gniuždant bandymai atliekami su skirtingų sudėčių bandiniais, kad būtų galima nustatyti optimalią sudėtį ir tęsti tolimesnius bandymus su šia sudėtimi.

3 lentelė. Skirtingų sudėčių bandinių gniuždymo stiprio bandymo rezultatai, kietinant ore ir CO₂ dujose

Bandinio nr.	Diametras, mm	Aukštis, mm	Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Suirimo jėga, kN	Gniuždomasis stipris, N/mm ²
Bandiniai kietinti ore						
3'	100,34	34,20	555,20	2054,02	206,00	26,06
4'	100,34	33,60	562,20	2117,06	225,51	28,53
5'	100,34	36,25	571,50	1994,76	203,14	25,70
6'	100,34	33,30	545,60	2073,06	206,30	26,10
Bandiniai kietinti 28 paras CO ₂ aplinkoje						
3c	100,34	37,32	575,50	1951,13	143,46	18,15
4c	100,34	33,20	570,40	2173,82	386,69	48,93
5c	100,34	34,48	562,90	2065,60	352,34	44,58
6c	100,34	34,07	560,40	2081,17	300,16	37,98

Palyginus gniuždomojo stiprio bandymo rezultatus tarp ore kietintų bandinių ir CO₂ dujose 28 paras kietintų bandinių, matyti, jog daugiausiai pakito 5 sudėties gniuždomojo stipris, tai yra 73,45 %. 4 ir 6 sudėtys taip pat parodė nemažą gniuždomojo stiprio prieaugį po kietinimo CO₂ aplinkoje (4 sudėtis – 71,47 %, 6 sudėtis – 45,5 %). Taip pat iš rezultatų matome, jog 3 sudėties bandymas yra nepavykęs, jo rezultatų nuokrypis yra per didelis, todėl į sudėties atrinkimą neįtraukiamas. Taigi, atsižvelgiant į didžiausią stiprio pokytį tarp ore kietinto ir anglies dioksido kietintų bandinių, tolimesni bandymai tęsimi su 5 sudėtimi.

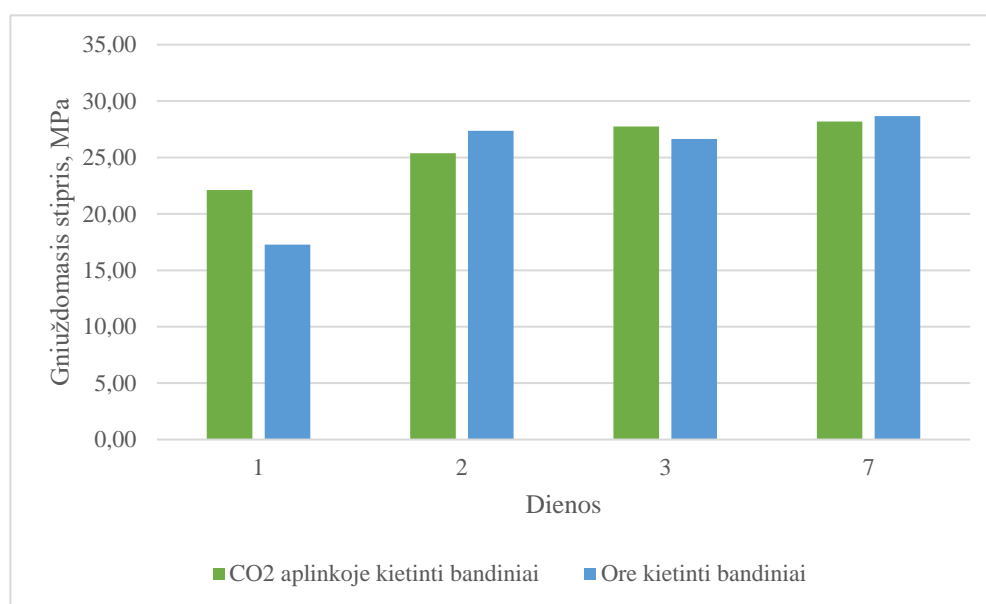


19 pav. Skirtingų sudėčių stiprio pokytis lyginant bandinius kietintus CO₂ aplinkoje ir ore

4 lentelė. 5 sudėties cementinių bandinių, kietintų skirtingą parų kiekį ore ir CO₂ dujose, gniuždymo stiprio bandymo rezultatai

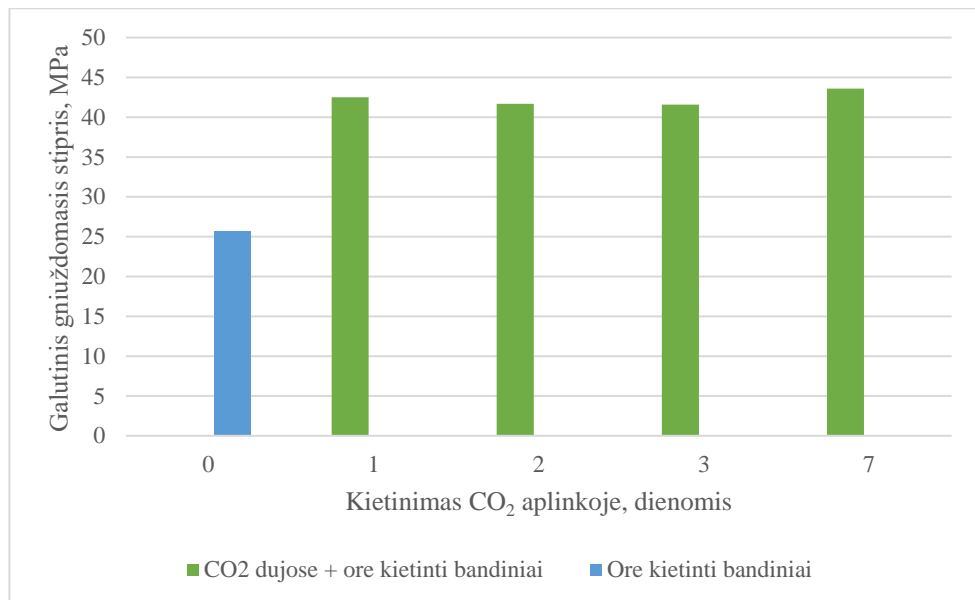
Bandinio nr.	Diametras, mm	Aukštis, mm	Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Suirimo jėga, kN	Gniuždomasis stipris, N/mm ²
5c ₁	100,34	34,72	577,30	2103,80	174,83	22,12
5c ₂	100,34	34,47	570,90	2095,56	200,60	25,38
5c ₃	100,34	34,53	577,20	2115,01	219,30	27,75
5c ₇	100,34	34,94	579,20	2097,43	222,72	28,18
5c ₁ ²⁸	100,34	34,90	573,20	2078,08	335,99	42,51
5c ₂ ²⁸	100,34	33,00	516,60	1980,72	329,54	41,70
5c ₃ ²⁸	100,34	33,00	564,50	2164,37	328,69	41,59
5c ₇ ²⁸	100,34	34,00	574,10	2136,44	344,61	43,60
5'₁	100,34	34,73	565,60	2060,57	136,54	17,28
5'₂	100,34	33,50	573,90	2167,57	216,29	27,37
5'₃	100,34	33,00	558,40	2140,98	210,52	26,64
5'₇	100,34	34,00	580,10	2158,77	226,54	28,66

4 lentelėje pateikiami 5 sudėties cementinių bandinių, kietintų skirtingomis, sąlygomis gniuždomojo stiprio bandymo rezultatai.



20 pav. Cementinių bandinių gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kietinimo laiko ir sąlygų

20 paveiksle pateikta diagrama nurodo kaip kito 5 sudėties bandinių, kurie buvo kietinti dviem būdais (CO₂ aplinkoje ir ore) gniuždomasis stipris, atsižvelgiant į kietinimo sąlygas ir laiką. Diagramoje matome, jog po 1 dienos kietinimo CO₂ dujose matomas žymus gniuždomojo stiprio šuolis, jis padidėjo net 28 %. Tačiau po 2 dienų ir po 7 dienų, galima matyti rezultatų anomalijas, ore kietintų bandinių stipris didesnis už CO₂ aplinkoje kietintų bandinių. Šioje vietoje daroma prielaida, jog tai galėjo atsitikti dėl to, jog bandiniai buvo gaminti skirtingomis dienomis ir ore kietintiems gaminiams buvo naudotas naujas cementas, todėl turime aukštesnes stiprio vertes ir rezultatų paklaidą.



21 pav. Cementinių bandinių galutinis gniuždomasis stipris. Palyginimas tarp 28 d. ore kietinto bandinio ir tam tikrą dieną CO₂ dujose (atitinkamos sąlygomis (žr. 2 lentelę)) kietintų gaminių

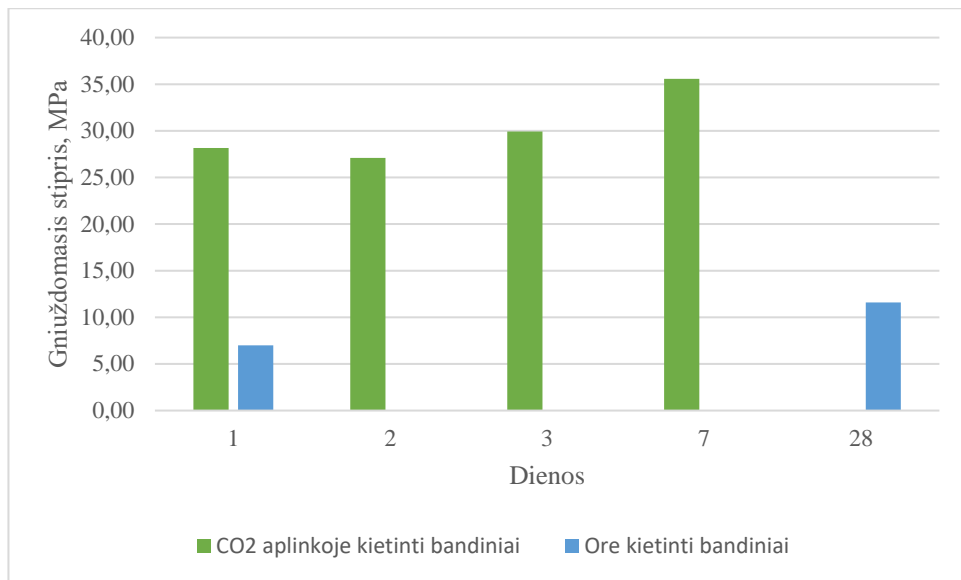
21 paveiksle matome, kad galutiniam gaminio stipriui daugiausiai įtakos daro pirmoji CO₂ dujose kietinimo diena. Tik vieną dieną karbonizuotų bandinių galutinis stipris daugiau nei du kartus paaugo lyginti su ore kietinto bandinio galutiniu stipriu. Kitų bandinių ($5_{c2^{28}}$, $5_{c3^{28}}$, $5_{c7^{28}}$) gniuždomojo stiprio reikšmės nedaug skiriasi nuo $5_{c1^{28}}$ bandinio, pavyzdžiui 7 dienas kietinto bandinio ($5_{c7^{28}}$) galutinis stipris skiriasi tik 2,6 %. Todėl galime daryti išvadą, jog tolimesnis bandinių laikymas kameroje nebe efektyvus.

3.1.2. Kalkinių bandinių stipris gniuždant

Atrinkta optimali frakcija, naudojama ir kalkiniams bandiniams gaminti. Kalkinių bandinių gamybai naudojama ta pati technologija ir sudėtis, tik cementas pakeičiamas kalkėmis.

5 lentelė. Kalkinių bandinių, kietintų skirtingą parų kiekį ore ir CO₂ dujose, gniuždymo stiprio bandymo rezultatai

Bandinio nr.	Diametras, mm	Aukštis, mm	Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Suirimo jėga, kN	Gniuždomasis stipris, N/mm ²
7c ₁	100,34	33,00	558,70	2142,14	222,59	28,16
7c ₂	100,34	32,50	561,60	2186,38	214,22	27,10
7c ₃	100,34	33,00	568,50	2179,71	236,52	29,93
7c ₇	100,34	34,72	577,50	2104,53	281,15	35,57
7c ₁ ²⁸	100,34	34,00	571,90	2128,25	285,55	36,13
7c ₂ ²⁸	100,34	34,10	575,80	2136,48	284,63	36,01
7c ₃ ²⁸	100,34	33,80	560,70	2098,92	296,24	37,48
7c ₇ ²⁸	100,34	32,50	539,40	2099,95	298,40	37,76
7' ₁	100,34	34,20	562,70	2081,77	55,25	6,99
7'	100,34	32,50	514,90	2004,57	91,60	11,59



22 pav. Kalkinių bandinių gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kietinimo laiko ir sąlygų

Atlikus bandymus su kalkiniais bandiniais, gautas 4 kartus didesnis gniuždomasis stipris tik po vienos paros kietinimo CO₂ dujose, lyginant su vieną parą ore kietintu bandiniu. Taip pat 1 parą CO₂ dujose kietinto bandinio gniuždomasis stipris yra 2,45 karto didesnis lyginant su 28 dienas ore kietintu bandiniu. Lyginant 7_{c1} ir 7_{c7} bandinius, matoma panaši tendencija kaip ir cementinių bandinių, po vienos paros tolimesnis kietinimas kameroje nebedaro tokio didelės įtakos stipriui, šiuo atveju, stipris padidėjo 20%. Gautas rezultatas pranoksta cementinius bandinius, bet taip pat patvirtina, jog pirmoji kietinimo para CO₂ dujose daro didžiausią įtaką, gaminio stiprumui.

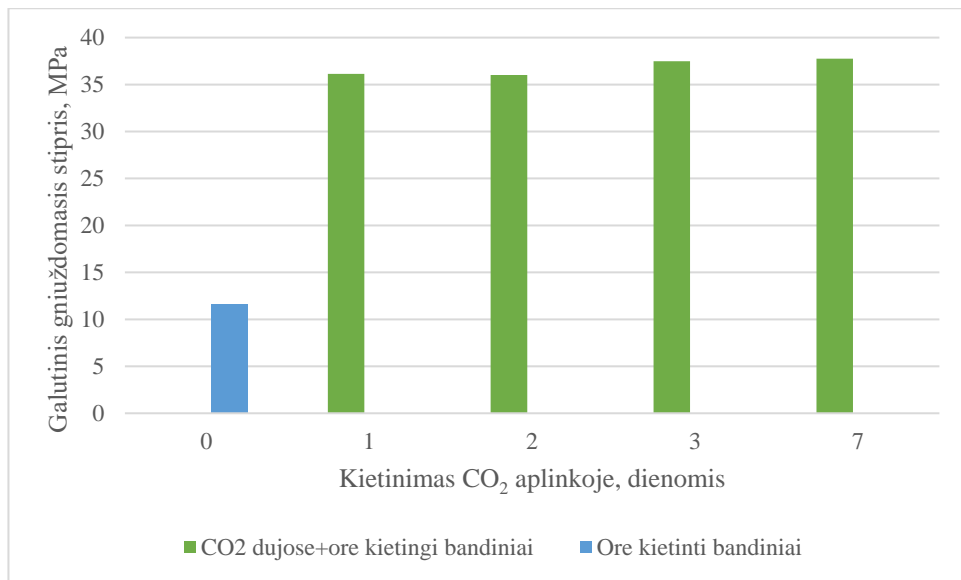


23 pav. 7_{c1} bandinio suirimas



24 pav. 7_{c7} bandinio suirimas

Gniuždant bandinius pastebėtas skirtingas suirimas, matoma, vos vienos dienos CO₂ dujose užteko tam, kad susidarytų tvirtesnė bandinio struktūra (žiūrėti 23 pav. ir 24 pav.).



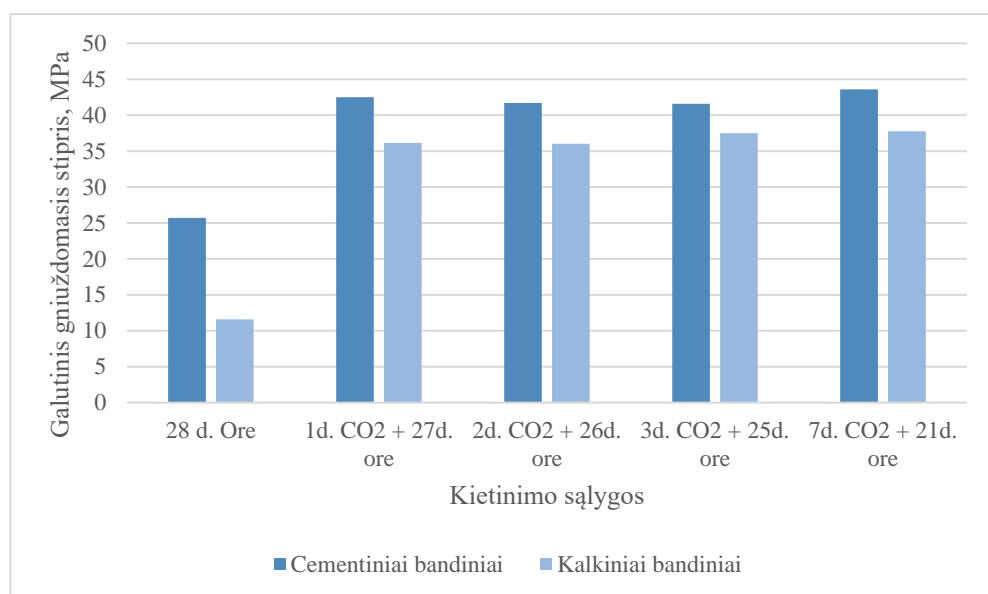
25 pav. Kalkinių bandinių galutinis gniuždomasis stipris. Palyginimas tarp 28 d. ore kietinto bandinio ir CO₂ dujose (atitinkamos sąlygomis (žr. 2 lentelę)) kietintų gaminių

25 paveiksle esanti diagrama iliustruoja kaip skiriasi galutiniai bandinių stipriai atsižvelgiant į tai kiek dienų kalkinis bandinys buvo karbonizuotas CO₂ dujose. Gniuždomojo stiprio pokytis tarp 1 paros ir 7 parų yra vos 4,5 %. Tuo tarpu matomas žymus pokytis tarp bandinių tam tikrą laiką kietintų žaliuoju būdu (žali diagramos stulpeliai) ir ore 28 paras kietintų bandinių (mėlynas diagramos stulpelis). Vos vienos dienos kietinimas CO₂ aplinkoje, galutinį bandinio gniuždomąjį stiprį padidino 3,1 karto.

Taigi apibendrinant tiek cementinių, tiek kalkinių bandinių rezultatus, galime teigti, jog reikšmingiausia kietinimui yra pirmoji para CO₂ kameroje, nes per pirmąsias 24 valandas yra gaunamas didžiausias gniuždomojo stiprio pokytis.

3.1.3. Cementinių ir kalkinių bandinių stiprio gniuždant palyginimas

Atlikus bandymus tiek su cementiniais, tiek su kalkiniais bandiniais rezultatai palyginami.



26 pav. Cementinių ir kalkinių bandinių galutinio gniuždomojo stiprio palyginimas

26 paveiksle esanti diagrama iliustruoja skirtumą tarp tomis pačiomis sąlygomis kietintų cementinių ir kalkinių bandinių. Ore kietintų bandinių stipris ženkliai skiriasi, cementinio bandinio stipris yra 2,2 karto didesnis. Bet ryškus stiprių skirtumas mažėja, kai bandiniai yra kietinami CO₂ dujose. Galutiniai bandinių stipriai skiriasi tik per 9-15 %, kai kietinimui naudojama „žalioji“ technologija. Šie rezultatai leidžia daryti prielaidą, jog kalkinių bandinių kietinimo metu galime utilizuoti didesnę CO₂ dujų kiekį. Nes gesintų kalkių rišiklis (Ca(OH)₂) absorbuoja didesnę kiekį CO₂ dujų ir taip susiformuoja didesnis kiekis stabilaus kalcio karbonato (CaCO₃). Taigi įvertinus, jog su kalkiniu rišikliu galime pasiekti gniuždymo stiprį artimą cementiniams bandiniams, kalkiniai bandiniai gali tapti ekologiškesne alternatyva. Taip pat kalkinių bandinių gamybai sunaudojama mažiau energijos, kalkių gamybos metu, reikiama degimo temperatūra yra 1100°C, tuo tarpu cemento gamybos metu reikalinga 1450°C degimo temperatūra.

3.2. Karbonizacijos gylis

3.2.1. Cementinių bandinių karbonizacijos gylis

Pirmiausia karbonizacijos bandymai buvo atliekami su skirtingų frakcijų bandiniais (3' ir 3c, 4' ir 4c, 5' ir 5c, 6' ir 6c), po 28 dienų kietinimo ir gauti rezultatai lyginami tarpusavyje. Žemiau patektose nuotraukose (27 pav., 28 pav., 29 pav., 30 pav.) galima matyti perskeltus ir fenolftealiniu nupurkštus bandinius. Ore kietintų bandinių karbonizacijos gylis iš visų pusių yra vos keletas milimetrų, išskyrus iš apačios, ten karbonizacijos gylis lygus 0 mm (žiūrėti 6 lentelę). Taip atsitiko dėl to, jog bandiniai buvo kietinti ant vientisos medinės lentynos ir oras negalėjo patekti per bandinių apačią. Mažiausiai ore karbonizavosi 4 ir 5 sudėties bandiniai. CO₂ kameroje kietinti gaminiai po 28 parų pasiekė pilną karbonizaciją, CO₂ kameroje esančios lentynos iš grotelių, garantavo dujų prasiskverbimą ir per bandinio apačią. Taip pat vertinant rezultatus reiktų atsižvelgti, jog bandiniai buvo ganėtinai žemi (33 - 35 mm), todėl CO₂ dujoms buvo lengviau prasiskverbti pro visą gaminio aukštį.



27 pav. 3' ir 3c bandinių karbonizacijos gylis



28 pav. 4' ir 4c bandinių karbonizacijos gylis



29 pav. 5' ir 5c bandinių karbonizacijos gylis



30 pav. 6' ir 6c karbonizacijos gylis

6 lentelė. Karbonizacijos gylis

Bandinio nr.	Karbonizacijos gylis	
	3'	iš viršaus
iš apačios		0mm
iš kraštų		7mm
3c	iš viršaus	pilna karbonizacija
	iš apačios	pilna karbonizacija
	iš kraštų	pilna karbonizacija
4'	iš viršaus	3mm
	iš apačios	0mm
	iš kraštų	3mm
4c	iš viršaus	pilna karbonizacija
	iš apačios	pilna karbonizacija
	iš kraštų	pilna karbonizacija
5'	iš viršaus	2mm
	iš apačios	0mm
	iš kraštų	3mm
5c	iš viršaus	pilna karbonizacija
	iš apačios	pilna karbonizacija
	iš kraštų	pilna karbonizacija
6'	iš viršaus	5.5mm
	iš apačios	0mm
	iš kraštų	7mm
6c	iš viršaus	pilna karbonizacija
	iš apačios	pilna karbonizacija
	iš kraštų	pilna karbonizacija

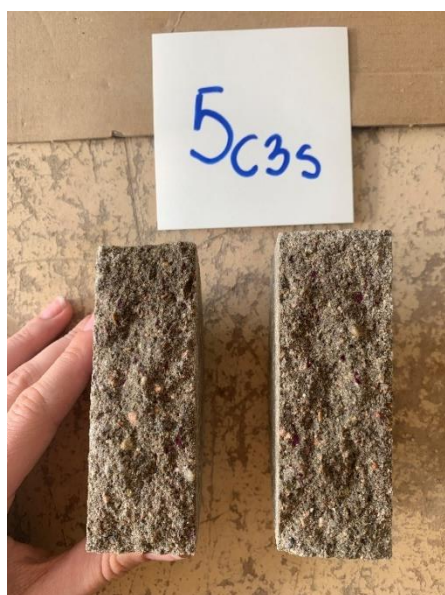
Tolimesnis tyrimas buvo atliekamas su 5 sudėties cementiniais bandiniais, siekiant iširti jų karbonizacijos priklausomybę nuo kietinimo laiko. Buvo skeliami 5_{c1} , 5_{c2} , 5_{c3} ir 5_{c7} bandiniai. Pateiktose nuotraukose matoma, kad jau po pirmos dienos kietinimo CO_2 kameroje, bandinys yra beveik pilnai karbonizuotas (31 pav.). Bet kadangi cemento hidratacija vis dar vyksta, ir šis procesas trunka keletą dienų, turime vis naujai susidarancio $Ca(OH)_2$. Todėl visuose bandiniuose iki 5_{c7} , vis dar matoma avietinės spalvos taškelių, nurodančių kalcio hidroksido užuomazgas.



31 pav. 5_{c1} bandinio karbonizacijos gylis



32 pav. 5_{c2} bandinio karbonizacijos gylis



33 pav. 5_{c3} bandinio karbonizacijos gylis



34 pav. 5_{c7} bandinio karbonizacijos gylis

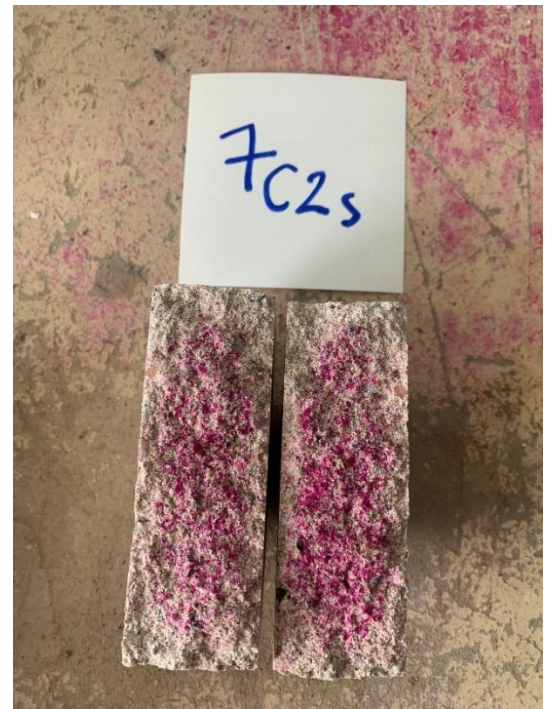
3.2.2. Kalkinių bandinių karbonizacijos gylis

Analogišku būdu buvo atliekami bandymai su kalkiniais bandiniais (7 sudėtis). 38 paveiksle matoma, kad bandinys pasiekė pilną karbonizaciją po 7 dienų kietinimo CO_2 aplinkoje. Ore kietinti kalkiniai

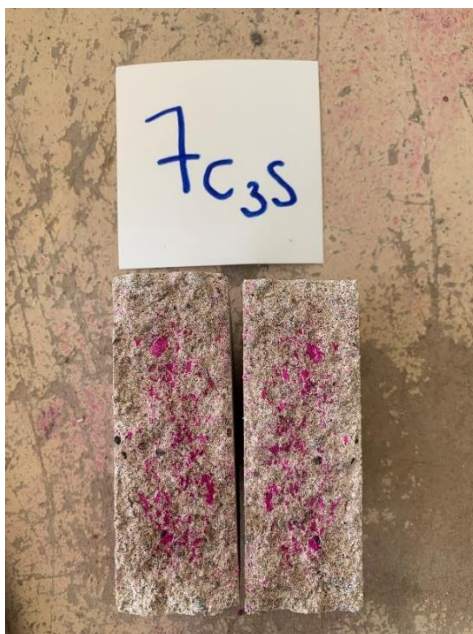
bandiniai nebuvo skeliami karbonizacijos gyliui matuoti, nes yra žinoma, jog natūrali karbonizacija pasiekia tik 5-7 mm storio sluoksnį, nes susidaręs kalcio karbonatas sunkiai praleidžia CO₂ dujas. Bet iš nuotraukų galima daryti išvadą, jog pagreitinta kietinimo karbonizacija (angl. *accelerated carbonation*) buvo efektyvi.



35 pav. 7_{c1} bandinio karbonizacijos gylis



36 pav. 7_{c2} bandinio karbonizacijos gylis



37 pav. 7_{c3} bandinio karbonizacijos gylis



38 pav. 7_{c7} bandinio karbonizacijos gylis

Lyginant cementinių ir kalkinių bandinių karbonizaciją, galima teigti, jog cementiniai bandiniai karbonizuojasi greičiau. Taip galėjo nutikti dėl to, nes naudojant kalkes kaip rišiklį, bandinio sudėtyje yra kur kas daugiau kalcio hidroksido ir reikia daugiau laiko didesniai kiekiui sureaguoti su anglies dioksidu.

3.3. Vandens įgeriamumo kinetika ir bandinių poringumas

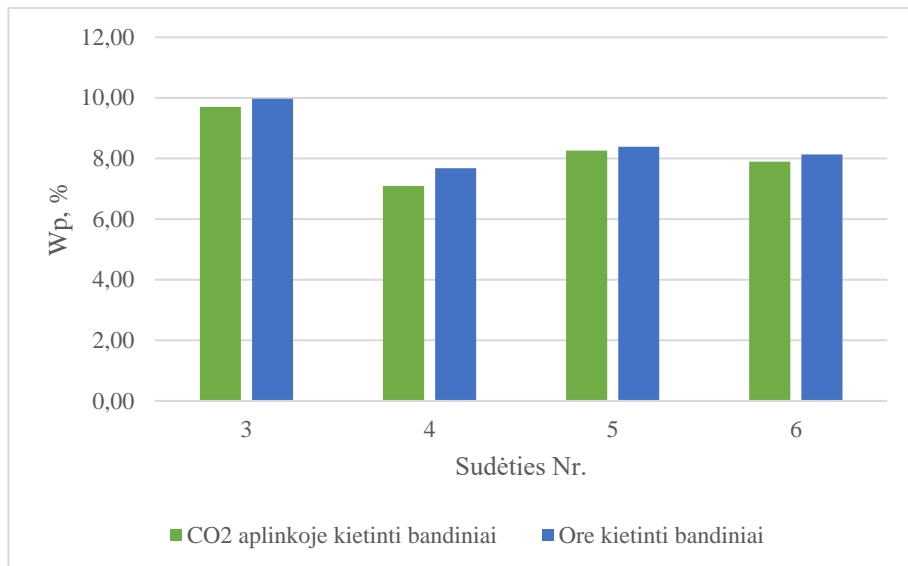
3.3.1. Cementinių bandinių įgeriamumo kinetika ir poringumas

Pirmiausia vandens įgeriamumo bandymus atlikus su skirtingų sudėčių bandiniais, kietintais skirtingais būdais (3', 4', 5', 6' - 28dienas kietinti ore, 3c, 4c, 5c, 6c - 28dienas kietinti CO₂ aplinkoje), gauta įgeriamumo kinetika. Rezultatai rodo (žiūrėti 7 lentelę), jog lyginant visų sudėčių bandinius, CO₂ dujose kietintų bandinių vandens įgertis pagal masę ir pagal tūri yra mažesnė, nei ore kietintų tos pačios sudėties bandinių. Nors ir skirtumas nėra labai didelis, bet tai patvirtina prielaidą, jog kietinimas CO₂ dujose daro gaminius tankesnius ir pagerina vandens įgeriamumo savybes.

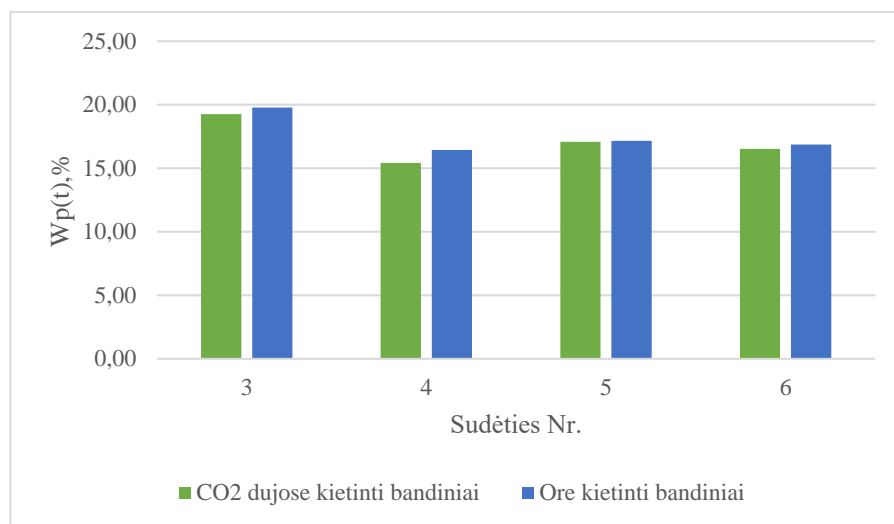
Apskaičiavus bandinių poringumą, pastebėta, jog lyginant analogiškas sudėtis, bendras poringumas visuomet yra mažesnis „žaliuoju“ būdu kietintų gaminių. 4 sudėtis pasižymi didžiausiu poringumo skirtumu, po kietinimo CO₂ kameroje, poringumas sumažėjo 5,9%. Visų CO₂ kameroje kietintų bandinių atviras poringumas buvo mažesnis nei ore kietintų bandinių, uždaro poringumo procentinė dalis beveik visuose CO₂ aplinkoje kietintuose bandiniuose (išskyrus 3c) buvo didesnis, nei ore kietintų bandinių.

7 lentelė. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių įgerties kinetika ir poringumas

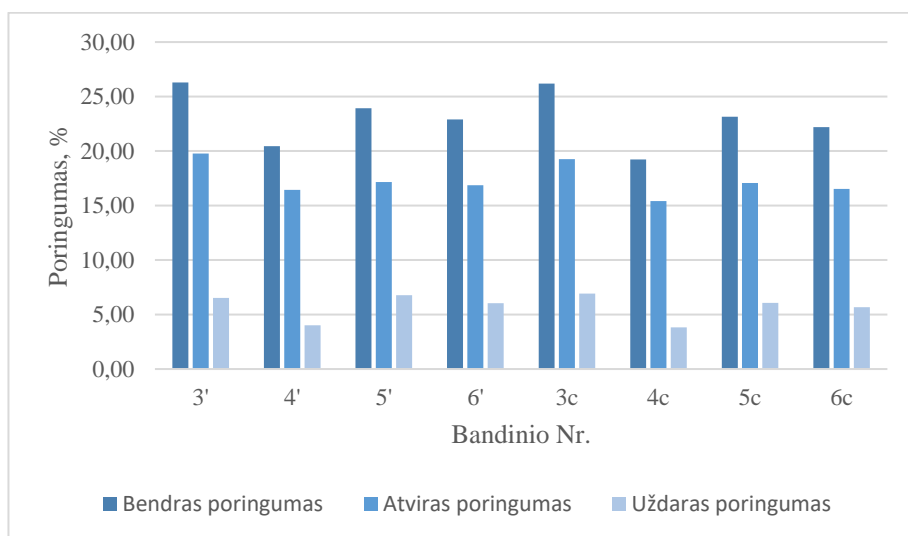
Bandinio nr.	m _s	m ₁₅	m ₆₀	m ₂₄	m ₄₈	m _v	Wp, %	ρ, kg/m ³	Wp(t),%	W1, %	W2, %	Santykis W1(s)	Santykis W2(s)	W, %	Pp, %	Pa, %	Pu, %
3' (1)	253,54	274,94	275,42	276,28	278,14	150,33	9,70	1984	19,25	8,44	8,63	0,87	0,89	8,97	26,26	19,25	7,01
3' (2)	275,38	298,7	299,73	301,5	303,59	164,61	10,24	1981	20,30	8,47	8,84	0,83	0,86	9,49	26,34	20,30	6,04
Vidurkis:							9,97	1982,58	19,77	8,45	8,74	0,85	0,88	9,23	26,30	19,77	6,53
4' (1)	243,84	260	260,31	261,45	262,63	148,64	7,71	2139	16,48	6,63	6,75	0,86	0,88	7,22	20,48	16,48	3,99
4' (2)	268,42	286,44	286,27	288,06	288,97	163,59	7,66	2141	16,39	6,71	6,65	0,88	0,87	7,32	20,41	16,39	4,02
Vidurkis:							7,68	2139,99	16,44	6,67	6,70	0,87	0,87	7,27	20,45	16,44	4,01
5' (1)	280,71	301,51	301,76	302,88	304,26	167,22	8,39	2048	17,18	7,41	7,50	0,88	0,89	7,90	23,85	17,18	6,67
5' (2)	279,57	300,77	300,78	301,63	303,01	166,23	8,38	2044	17,14	7,58	7,59	0,90	0,90	7,89	24,02	17,14	6,88
Vidurkis:							8,39	2046,16	17,16	7,50	7,54	0,89	0,90	7,89	23,93	17,16	6,77
6' (1)	263,53	280,39	281,82	283,51	284,59	157,99	7,99	2082	16,64	6,40	6,94	0,80	0,87	7,58	22,62	16,64	5,98
6' (2)	292,83	312,94	314,09	316,05	317,07	175,35	8,28	2066	17,10	6,87	7,26	0,83	0,88	7,93	23,19	17,10	6,08
Vidurkis:							8,13	2073,93	16,87	6,63	7,10	0,82	0,87	7,76	22,90	16,87	6,03
3c (1)	244,63	263,98	264,68	265,96	268,25	145,11	9,66	1987	19,18	7,91	8,20	0,82	0,85	8,72	26,15	19,18	6,97
3c (2)	311,5	337,31	338,01	339,12	341,86	184,89	9,75	1984	19,34	8,29	8,51	0,85	0,87	8,87	26,23	19,34	6,89
Vidurkis:							9,70	1985,53	19,26	8,10	8,35	0,83	0,86	8,79	26,19	19,26	6,93
4c (1)	287,33	305,12	304,8	306,53	307,97	175,62	7,18	2171	15,60	6,19	6,08	0,86	0,85	6,68	19,29	15,60	3,70
4c (2)	265,58	281,52	281,86	282,82	284,19	162,04	7,01	2174	15,24	6,00	6,13	0,86	0,87	6,49	19,17	15,24	3,94
Vidurkis:							7,10	2172,60	15,42	6,10	6,11	0,86	0,86	6,59	19,23	15,42	3,82
5c (1)	299,13	319,91	320,33	321,71	323,88	179,13	8,27	2067	17,10	6,95	7,09	0,84	0,86	7,55	23,18	17,10	6,08
5c (2)	267,13	286,19	286,15	278,35	289,15	160	8,24	2068	17,05	7,14	7,12	0,87	0,86	4,20	23,11	17,05	6,06
Vidurkis:							8,26	2067,45	17,07	7,04	7,10	0,85	0,86	5,87	23,14	17,07	6,07
6c (1)	290,63	309,83	309,66	311,51	313,35	174,78	7,82	2097	16,40	6,61	6,55	0,85	0,84	7,18	22,03	16,40	5,64
6c (2)	270,71	289,37	289,2	290,49	292,29	162,67	7,97	2088	16,65	6,89	6,83	0,86	0,86	7,31	22,36	16,65	5,71
Vidurkis:							7,89	2092,92	16,52	6,75	6,69	0,85	0,85	7,25	22,20	16,52	5,67



39 pav. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių vandens įgeriamumas pagal masę



40 pav. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių vandens įgeriamumas pagal tūrį

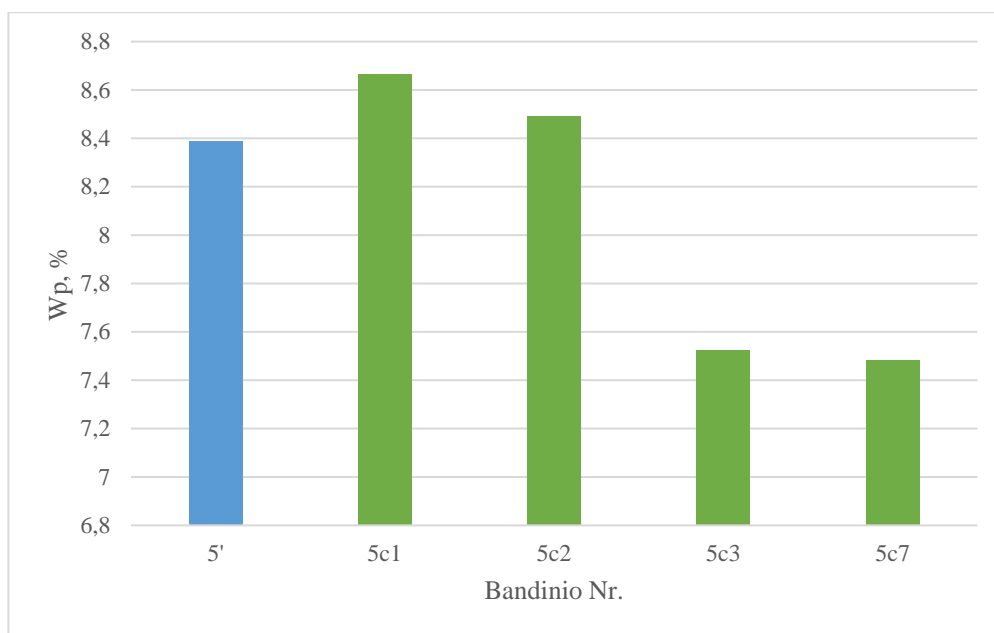


41 pav. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių poringumas

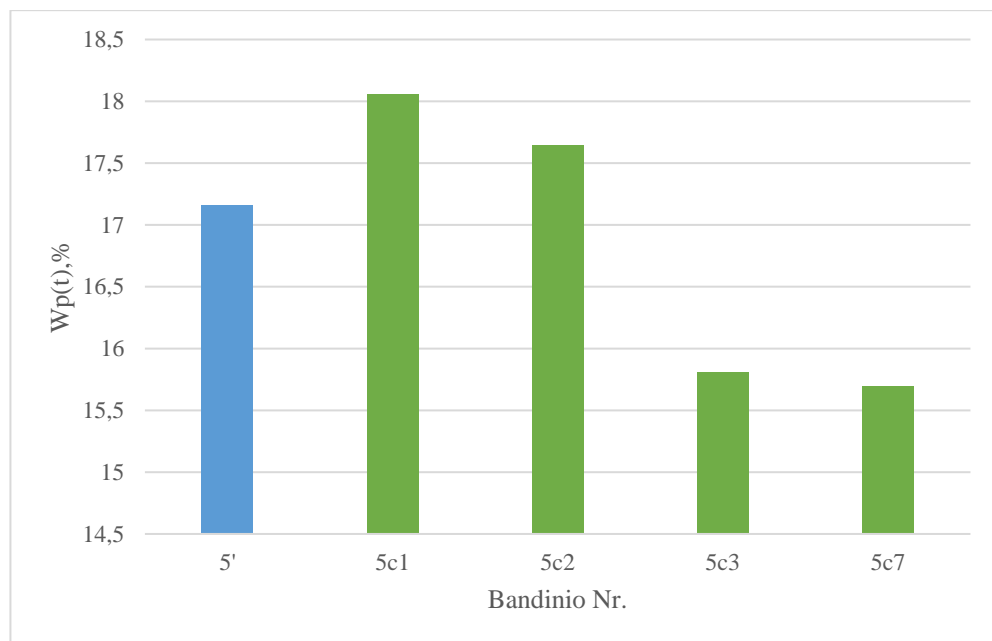
8 lentelė. 5 sudėties cementinių bandinių kietintų skirtingomis sąlygomis įgerties kinetika ir poringumas

Bandinio nr.	m _s , g	m ₁₅ , g	m ₆₀ , g	m ₂₄ , g	m ₄₈ , g	m _v , g	Wp, %	ρ, kg/m ³	Wp(t),%	W1, %	W2, %	Santykis W1(s)	Santykis W2(s)	W, %	Pp, %	Pa, %	Pu, %
5c ₁ (1)	266,3	288,2	288	289,03	289,68	161,73	8,78	2081	18,27	8,22	8,15	0,94	0,93	8,54	22,63	18,27	4,36
5c ₁ (2)	286,1	309,2	309	309,7	310,57	173,36	8,55	2085	17,83	8,07	8,00	0,94	0,94	8,25	22,49	17,83	4,65
Vidurkis:							8,67	2083,20	18,05	8,15	8,08	0,94	0,93	8,39	22,56	18,05	4,50
5c ₂ (1)	266,1	286,9	287,1	288,1	288,79	160,86	8,53	2080	17,74	7,82	7,89	0,92	0,93	8,27	22,67	17,74	4,94
5c ₂ (2)	296,9	320,5	320,6	321,3	322	179,04	8,45	2077	17,56	7,95	7,98	0,94	0,94	8,22	22,80	17,56	5,24
Vidurkis:							8,49	2078,42	17,65	7,88	7,94	0,93	0,93	8,24	22,74	17,65	5,09
5c ₃ (1)	308,1	329,1	329,1	330,35	331,08	185,05	7,46	2110	15,74	6,82	6,82	0,91	0,91	7,22	21,57	15,74	5,83
5c ₃ (2)	260,1	277,9	278,1	278,68	279,84	155,51	7,59	2092	15,88	6,84	6,92	0,90	0,91	7,14	22,23	15,88	6,35
Vidurkis:							7,52	2100,93	15,81	6,83	6,87	0,91	0,91	7,18	21,90	15,81	6,09
5c ₇ (1)	266,1	284,3	284,3	284,21	286	158,87	7,48	2093	15,65	6,84	6,84	0,91	0,91	6,81	22,19	15,65	6,54
5c ₇ (2)	290,1	310	310,65	310,65	311,82	173,74	7,49	2101	15,73	6,86	7,08	0,92	0,95	7,08	21,90	15,73	6,17
Vidurkis:							7,48	2097,04	15,69	6,85	6,96	0,92	0,93	6,94	22,04	15,69	6,35

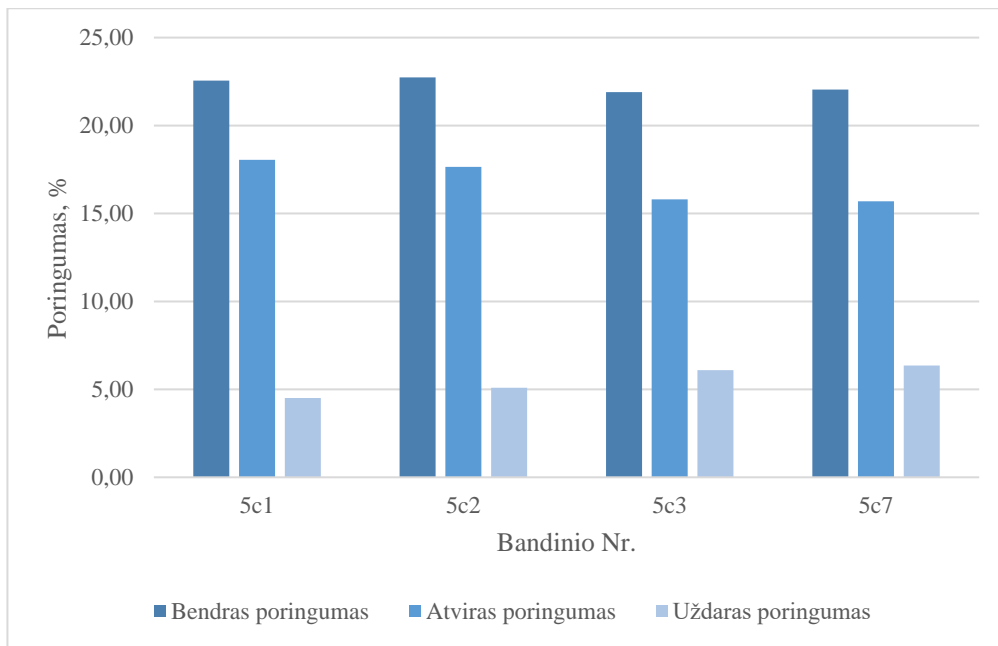
Sekantys bandymai buvo atlikti su tos pačios sudėties cementiniais bandiniais kietintais skirtingą laiką CO₂ kameroje, siekiant nustatyti kaip vandens įgėrį keičia karbonizacijos laikas. 42 ir 43 paveiksluose esančios diagramos iliustruoja, kaip krenta vandens įgertis vis ilgiau kietinant gaminius CO₂ kameroje. Ženklus vandens įgeriamumo sumažėjimas matomas tarp antros ir trečios kietinimo parų (5c₂ ir 5c₃ bandiniai). Tuo tarpu tarp trijų ir septynių parų kietinimo skirtumas yra labai mažas. Diagramose matoma, kad bandinys 5', kuris buvo kietintas 28 dienas, pasižymi panašia vandens įgertimi kaip bandiniai 1 – 2 dienas kietinti CO₂ dujose. Taip pat pastebima atvirkštinė priklausomybė tarp vandens įgerties ir uždaro poringumo, mažėjant vandens įgerčiai, didėja uždaro poringumo procentinė dalis.



42 pav. 5 sudėties cementinių bandinių kietintų skirtingą laiką CO₂ dujose vandens įgeriamumas pagal masę



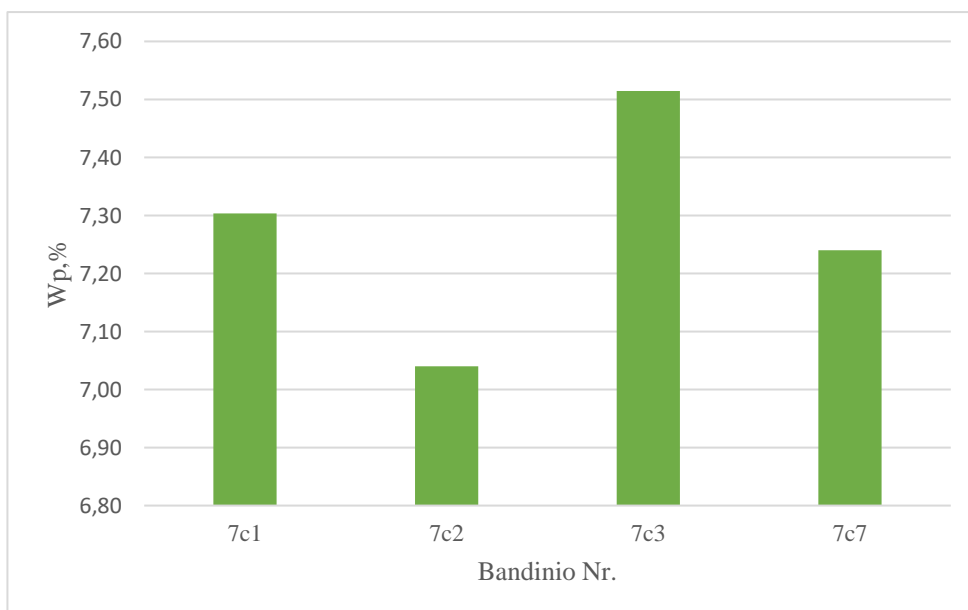
43 pav. 5 sudėties cementinių bandinių kietintų skirtingą laiką CO₂ dujose vandens įgeriamumas pagal tūrį



44 pav. 5 sudėties cementinių bandinių kietintų skirtingą laiką poringumas

3.3.2. Kalkinių bandinių įgeriamumo kinetika ir poringumas

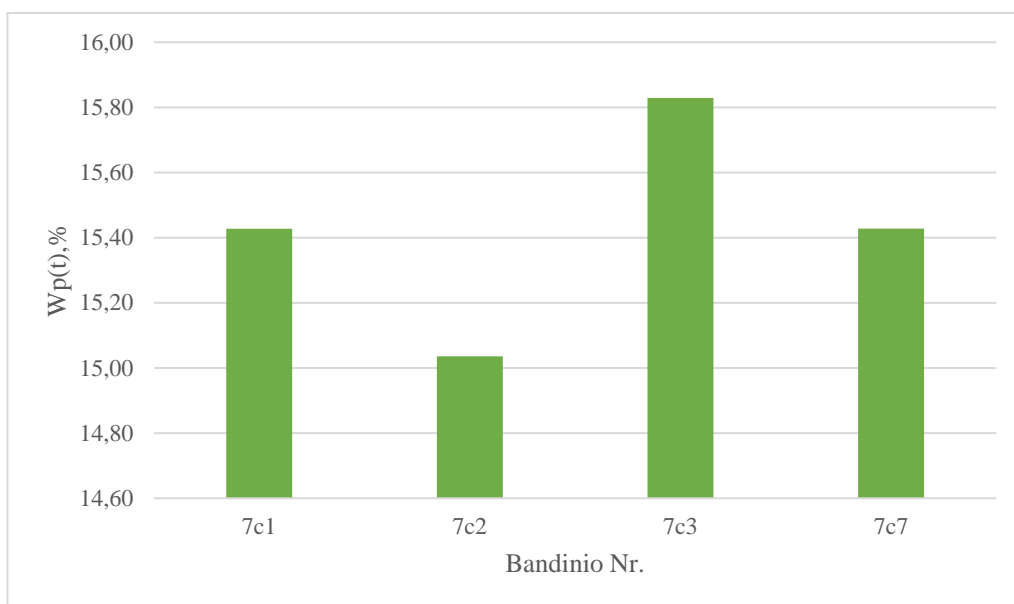
Įvertinus kalkinių bandinių vandens įgeriamumo kinetiką, gauti vandens įgerties rezultatai turi skirtingą kitimo tendenciją nei cementiniai bandiniai. Po dviejų parų kietinimo CO₂ aplinkoje vandens įgertis sumažėja lyginti su viena parą kietintu bandiniu, bet tris paras kietinto bandinio vandens įgertis padidėja ir net viršija 1 parą CO₂ dujose kietinto bandinio (7c₁). Taip galėjo nutikti dėl to, nes kai vyksta karbonizacijos reakcija susidaro papildomas reakcijos produktas – vanduo, kuris išgaruodamas iš bandinio gali sukurti kapiliarų „kelių“. Kitas variantas dėl ko taip galėjo atsitikti, tai kalcio karbonato susidarymas, kalcio karbonato tūris yra didesnis nei Ca(OH)₂, tai reiškia jog susidarantis CaCO₃ gali pradėti ardyti uždarų porų struktūrą.



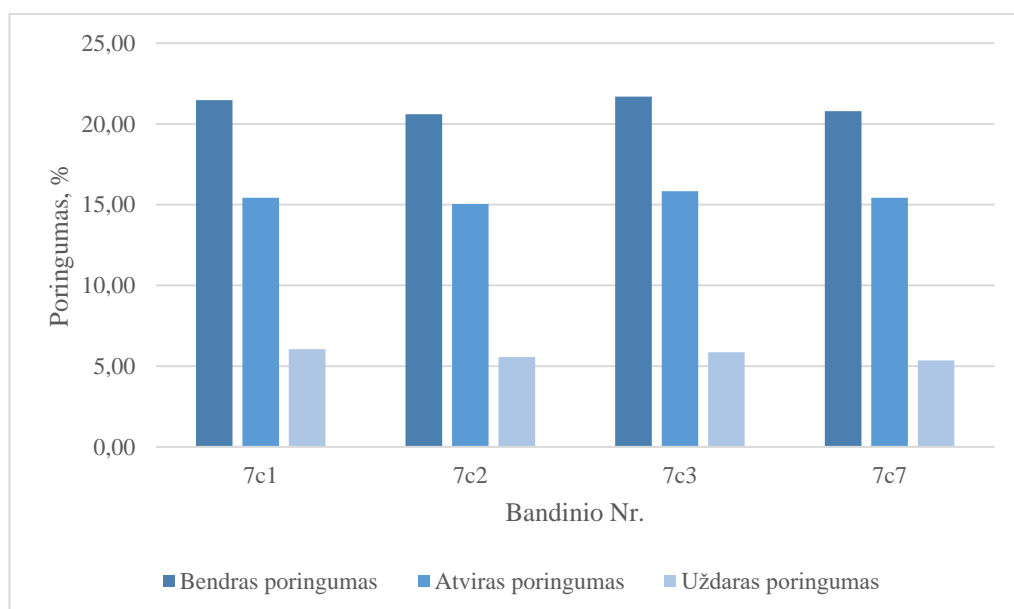
45 pav. 7 sudėties kalkinių bandinių kietintų skirtingą laiką CO₂ dujose vandens įgeriamumas pagal masę

9 lentelė. 7 sudėties kalkinių bandinių kietintų skirtingomis sąlygomis įgerties kinetika ir poringumas

Bandinio nr.	m_s, g	m₁₅, g	m₆₀, g	m₂₄, g	m₄₈, g	m_v, g	W_p, %	ρ, kg/m³	W_p(t), %	W₁, %	W₂, %	Santykis W₁(s)	Santykis W₂(s)	W, %	P_p, %	P_a, %	P_u, %
7c ₁ (1)	278	295,2	295,5	297,42	298,2	166,83	7,27	2116	15,38	6,19	6,29	0,85	0,87	6,99	21,33	15,38	5,96
7c ₁ (2)	314,4	334,1	334,8	336,59	337,48	188,37	7,34	2109	15,48	6,27	6,49	0,85	0,88	7,06	21,62	15,48	6,14
Vidurkis:							7,30	2112,34	15,43	6,23	6,39	0,85	0,88	7,02	21,47	15,43	6,05
7c ₂ (1)	295,3	313,1	313,4	313,59	316,54	177,67	7,19	2126	15,29	6,03	6,13	0,84	0,85	6,19	20,95	15,29	5,65
7c ₂ (2)	271,5	287,5	287,9	289,46	290,2	163,65	6,89	2145	14,78	5,89	6,04	0,86	0,88	6,62	20,25	14,78	5,47
Vidurkis:							7,04	2135,92	15,04	5,96	6,08	0,85	0,86	6,40	20,60	15,04	5,56
7c ₃ (1)	290,5	309,8	309,8	311,49	312,41	174,31	7,54	2104	15,87	6,64	6,64	0,88	0,88	7,23	21,80	15,87	5,94
7c ₃ (2)	288,1	306,8	306,9	308,79	309,67	173,09	7,49	2109	15,79	6,49	6,53	0,87	0,87	7,18	21,58	15,79	5,79
Vidurkis:							7,51	2106,47	15,83	6,57	6,58	0,87	0,88	7,20	21,69	15,83	5,86
7c ₇ (1)	265,8	281,9	282,4	284,36	285,19	160,39	7,29	2130	15,54	6,06	6,25	0,83	0,86	6,98	20,82	15,54	5,29
7c ₇ (2)	282,1	299	299,4	301,39	302,37	170,05	7,19	2132	15,32	5,99	6,13	0,83	0,85	6,84	20,75	15,32	5,43
Vidurkis:							7,24	2130,88	15,43	6,02	6,19	0,83	0,85	6,91	20,79	15,43	5,36



46 pav. 7 sudėties kalkinių bandinių kietintų skirtingą laiką CO₂ dujose vandens įgeriamumas pagal tūrį



47 pav. 7 sudėties kalkinių bandinių kietintų skirtingą laiką poringumas

Išvados

1. Pagaminti skirtingų tipų presuoti bandiniai. Bandiniai skiriasi užpildo frakcijomis ir skirtingais rišikliais. Pagal užpildų dydį bandiniai išskiriami į keturias grupes: su 0/1, 0/2, 0/4 ir parinktos frakcijos užpildais. Pagal rišiklio tipą bandiniai išskiriami į cementinius ir kalkinius.
2. Optimali presuoto betono sudėtis buvo atrinkta atsižvelgiant į didžiausią stiprio pokytį po kietinimo CO₂ aplinkoje. Atlikus stiprio gniuždant bandymus, galime teigti, jog 5 sudėtis, kurios užpildų frakcija 0/4 yra optimaliausia sudėtis, jos gniuždymo stipris padidėjo 73,45 % lyginant su ore kietintu bandiniu.
3. Atlikus stiprio gniuždant bandymus galima teigti, jog kietinimo karbonizacijai svarbiausia yra pirmoji kietinimo para, per ją bandinys įgyja ryškiausią gniuždomojo stiprio prieaugį (lyginant su ore kietintu bandiniu), toliau stipris didėja neženkiai. Per pirmąją parą CO₂ dujose įgyto gniuždomojo stiprio pokytis lyginant su ore kietintais bandiniais: cementinių bandinių – 28%, kalkinių bandinių – 4 kartai.
4. Bandymų metu pastebėta, jog kalkinių bandinių struktūrai sustiprėti pakanka vos vienos dienos kietinimo CO₂ dujose. Po vienos paros karbonizacijos, bandinio gniuždomasis stipris padidėjo 4 kartus lyginant su bandiniu 1 para kietintu ore, o galutinis stipris (kietinant 1 dieną CO₂ dujose+ 27 dienas ore) tapo 3,1karto didesnis lyginant su 28 paras ore kietintu bandiniu.
5. Lyginant cementinių ir kalkinių bandinių karbonizaciją, galima teigti, jog cementiniai bandiniai karbonizuojasi greičiau. Taip galėjo nutikti dėl to, nes naudojant kalkes kaip rišiklį, bandinio sudėtyje yra kur kas daugiau kalcio hidroksido ir reikia daugiau laiko didesniam kiekiui sureaguoti su anglies dioksidu. Tačiau abu bandiniai pasiekė pilną karbonizaciją po 7 dienų.
6. Įvertinus įgeriamumo kinetikos rezultatus, matoma, kad kietinant cementinius gaminius „žaliuoju“ būdu gaunama mažesnė vandens įgertis (pagal masę ir pagal tūrį) ir didesnė uždaro poringumo procentinė dalis. Tai nutinka dėl to, kad karbonizacijos metu poros užpildomos. Taip pat tam įtaką daro ir kietinimo karbonizacijos laikas, skirtumas tarp, vieną parą CO₂ dujose kietintų bandinių ir 7 paras, yra 13,7%.
7. Kalkinių bandinių vandens įgerties bei uždarų porų procentinės dalies kitimo tendencija nebuvo panaši į cementinių bandinių, rezultatai kito netolygiai ir ilgesnis kietinimo laikas CO₂ dujose nedarė teigiamos įtakos. Taip galėjo nutikti dėl dviejų dalykų: pirma, po Ca(OH)₂ reakcijos su anglies dioksidu, susidaręs vanduo išgaruodamas sudarė kapiliarų „kelią“ bandinyje arba susidarydamas kalcio karbonatas dėl savo didesnio tūrio galėjo suardyti dalį uždarų porų.
8. Karbonizacijos gylio ir gniuždomojo stiprio nustatymo bandymų rezultatai parodė, kad presuotų cementinių ir kalkinių gaminių gamyboje galima utilizuoti CO₂ dujas ir taip pagerinant gaminių savybes, kietinant juos šiose dujose.

Literatūros sąrašas

1. ASHRAF, W. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. In *Construction and Building Materials* . 2016. Vol. 120, p. 558–570. .
2. CHÁVEZ-ULLOA, E. ir kt. Corrosion Process of Reinforced Concrete by Carbonation in a Natural Environment and an Accelerated Test Chamber. In *Int. J. Electrochem. Sci.* . 2013. Vol. 8, p. 15. .
3. EL-HASSAN, H. Accelerated Carbonation Curing as a Means of Reducing Carbon Dioxide Emissions. In *Cement Industry* [interaktyvus]. 2020. [žiūrėta 2021-03-18]. . Prieiga per internetą: <<https://www.intechopen.com/online-first/accelerated-carbonation-curing-as-a-means-of-reducing-carbon-dioxide-emissions>>.
4. GALAN, I. ir kt. Assessment of the protective effect of carbonation on portlandite crystals. In *Cement and Concrete Research* . 2015. Vol. 74, p. 68–77. .
5. HAN, S.H. ir kt. CO₂ Curing Efficiency for Cement Paste and Mortars Produced by a Low Water-to-Cement Ratio. In *Materials* . 2020. Vol. 13, no. 17, p. 3883. .
6. HUANG, H. ir kt. Life-cycle assessment of emerging CO₂ mineral carbonation-cured concrete blocks: Comparative analysis of CO₂ reduction potential and optimization of environmental impacts. In *Journal of Cleaner Production* . 2019. Vol. 241, p. 118359. .
7. JIA, X. ir kt. Impact of CO₂ curing on the microhardness and strength of 0.35 w/c cement paste: Comparative study of internal/surface layers. In *Journal of Materials Research and Technology* . 2020. Vol. 9, no. 5, p. 11849–11860. .
8. KALIYAVARADHAN, S.K. - LING (BILL), T.-C. Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C & D) waste—An overview. In *Journal of CO₂ Utilization* . 2017. Vol. 20, p. 234–242. .
9. KASHEF-HAGHIGHI, S. - GHOSHAL, S. Physico–Chemical Processes Limiting CO₂ Uptake in Concrete during Accelerated Carbonation Curing. In *Industrial & Engineering Chemistry Research* . 2013. Vol. 52, no. 16, p. 5529–5537. .
10. KHAN, M.T. ir kt. Curing of Concrete by Carbon Dioxide. In . Vol. 05, no. 04, p. 5. .
11. KOVALSKA, A. - AUZINS, J. INVESTIGATION OF VIBROPRESSING PROCESS TECHNOLOGY. In *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT* . p. 5. .
12. LI, X. - LING, T.-C. Instant CO₂ curing for dry-mix pressed cement pastes: Consideration of CO₂ concentrations coupled with further water curing. In *Journal of CO₂ Utilization* . 2020. Vol. 38, p. 348–354. .
13. LIU, Z. - MENG, W. Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites: A review. In *Journal of CO₂ Utilization* . 2021. Vol. 44, p. 101428. .
14. MARCHIONI, M.L. ir kt. Compaction Test Method for Dry Concrete. In . 2012. p. 14. .
15. POPOVICS, S. A review of the concrete consolidation by vibration. In *Matériaux et Constructions* . 1973. Vol. 6, no. 6, p. 453–463. .

16. ROSTAMI, V. ir kt. Carbonation Curing versus Steam Curing for Precast Concrete Production. In *Journal of Materials in Civil Engineering* . 2012. Vol. 24, p. 1221–1229. .
17. ROSTAMI, V. ir kt. Durability of concrete pipes subjected to combined steam and carbonation curing. In *Construction and Building Materials* . 2011. Vol. 25, no. 8, p. 3345–3355. .
18. SHAO, Y. - MORSHED, A.Z. Early carbonation for hollow-core concrete slab curing and carbon dioxide recycling. In *Materials and Structures* . 2015. Vol. 48, no. 1, p. 307–319. .
19. SHI, C. ir kt. Factors affecting kinetics of CO₂ curing of concrete. In *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2021-03-08]. . Prieiga per internetą: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21650373.2012.727321>>.
20. SHI, C. ir kt. Weathering properties of CO₂-cured concrete blocks. In *Resources, Conservation and Recycling* . 2012. Vol. 65, p. 11–17. .
21. WIDAYANTO, E. ir kt. The effect of vibropressing compaction process on the compressive strength based concrete paving blocks. In *AIMS Materials Science* . 2020. Vol. 7, no. 3, p. 203–216. .
22. XUAN, D. ir kt. A maturity approach to estimate compressive strength development of CO₂-cured concrete blocks. In *Cement and Concrete Composites* . 2018. Vol. 85, p. 153–160. .
23. ZHANG, D. - SHAO, Y. Early age carbonation curing for precast reinforced concretes. In *Construction and Building Materials* . 2016. Vol. 113, p. 134–143. .
24. 12. Accelerated carbonation as a fast curing technology for concrete blocks | Elsevier Enhanced Reader. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-03-19]. Prieiga per internetą: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/B9780081020012000152?token=41FF6977FE3FBD754D1237114B5A488F17E2271174F9B12EA00A44887567A16AF45A0EA03E6F46A7C6A097D9F56D6A96>>.
25. Curing of Concrete by Carbon-dioxide [PDF]. In *The Constructor* [interaktyvus]. 2020. [žiūrėta 2021-03-14]. Prieiga per internetą: <<https://theconstructordotorg.wpcomstaging.com/concrete/curing-concrete-carbon-dioxide/39587/>>.
26. Effect of pre-conditioning on CO₂ curing of lightweight concrete blocks mixtures | Elsevier Enhanced Reader. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-10-25]. Prieiga per internetą: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0950061811002716?token=4D14D2B3A37831874BB91CBEF2F2F1C514FB4C0263F6B94537E062FA9B7F8DD4F9986F467910B978EE3FD8AF49AE6547&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211025174654>>.
27. Mechanical Properties of Concrete when cured with Carbon dioxide. In *International Journal of Engineering and Advanced Technology* . 2019. Vol. 8, no. 6, p. 2544–2549. .
28. Performance evaluation of dry-pressed concrete curbs with variable cement grades by using Taguchi method | Elsevier Enhanced Reader. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-03-14]. Prieiga per internetą: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2090447916301356?token=B34C30405E049A875703B96D18C593CAA6C5FE3077E3BF21DF7C4D6DDF42BCC06AF3B01D3B985526B0FE349A0C94AD75>>.

29. Rišamųjų medžiagų gaminių technologija | KTU e-knygos internetu. Elektroninės knygos. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-03-11]. Prieiga per internetą: <<https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1356/risamuju-medziagu-gaminiu-technologija/>>.

30. Statybinių medžiagų technologiniai procesai | KTU e-knygos internetu. Elektroninės knygos. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-03-14]. Prieiga per internetą: <<https://www.ebooks.ktu.lt/eb/361/statybiniu-medziagu-technologiniai-procesai/>>.