



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Lengvojo betono gamyba „žaliosios“ technologijos būdu
kietinant CO₂ aplinkoje**

Baigiamasis magistro projektas

Justas Barauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Algirdas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Lengvojo betono gamyba „žaliosios“ technologijos būdu
kietinant CO₂ aplinkoje**

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6121EX008)

Justas Barauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Algirdas Augonis

Vadovas

Doc. dr. Ernestas Ivanauskas

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Justas Barauskas

Lengvojo betono gamyba „žaliosios“ technologijos būdu kietinant CO₂ aplinkoje

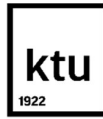
Akademinio sąžiningumo deklaracija

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.

Justas Barauskas

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.: ST18-F-09-1

(lietuvių k.): LENGVOJO BETONO GAMYBA „ŽALIOSIOS“ TECHNOLOGIJOS BŪDU
KIETINANT CO₂ APLINKOJE

(anglų k.):
MANUFACTURING OF LIGHTWEIGHT CONCRETE USING “GREEN” TECHNOLOGY BY
CURING IN 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

Konsultantas: _____
(indėlis _____ %) pareigos, vardas, pavardė

Konsultantas: _____
(indėlis _____ %) pareigos, vardas, pavardė

Studentas: Justas Barauskas
vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu

Barauskas, Justas. Lengvojo betono 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, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: betonas, lengvasis betonas, karbonizacija, anglies dioksidas, CO₂, betono kietinimas.

Kaunas, 2022. 53 p.

Santrauka

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas yra pagaminti lengvąjį betoną žaliosios technologijos būdu kietinant CO₂ aplinkoje ir nustatyti jo savybes. Darbo uždaviniai yra pagaminti lengvąjį putų betoną ir nustatyti jo mechanines, fizikines savybes kietinant CO₂ aplinkoje, taip pat įvertinti sunaudoto CO₂ kiekį. Šį darbą sudaro trys pagrindinės dalys: literatūros analizė, bandinių sudėtis ir tyrimų metodika bei eksperimentų rezultatai ir jų analizė.

Atliktoje literatūros analizėje aprašyti lengvojo betono gamybos būdai, jam pagaminti reikalingos medžiagos. Išsiaiškinti pagrindiniai karbonizacijos principai, vykstančios cheminės reakcijos ir naudojami kietinimo metodai. Išanalizuoti kitų tyrimų rezultatai, galima aplinkos sąlygų įtaką karbonizacijos efektyvumui.

Sekančioje dalyje pateikiamos darbe naudoto lengvojo putų betono sudėtys ir jo gamybą. Buvo atlikti eksperimentai siekiant parinkti geriausią betoną, su kurio tęsiami bandymai. Parinkta viena sudėtis su cementiniu rišikliu ir viena sudėtis su kalkiniu rišikliu. Šioje dalyje taip pat aprašomi bandymų metodai, juose naudojami prietaisai ir jų atlikimo eiga.

Eksperimentų rezultatai analizuojami trečioje dalyje. Atliekant bandymus nustatyta, kad tiek cementinių, tiek kalkinių CO₂ kietintų bandinių tankis yra visada didesnis už ore laikytų bandinių, dėl susidariusio kalcio karbonato. Taip pat įvertinta, kad kietinimo laikas turi didelę įtaką betono gniuždymo stipriui, tačiau ilgai laikyti bandinių kietinimo kameroje neverta, nes laikui bėgant įtaką stipriui mažėja ir tai nėra efektyvu. Vidutinis karbonizacijos gylis parodė, kad užtenka kelių valandų CO₂ kietinimo kameroje, kad pasiekti didesnę karbonizacijos gylį už 28 d. ore laikytų gaminių. Taip pat šioje dalyje buvo įvertintas ir bandinių sunaudoto CO₂ dujų kiekis, jis nustatytas dviem metodais, tankio pokyčio metodu ir titravimo metodu. Nustatyta, kad sunaudoto CO₂ kiekis taip pat labai priklauso nuo kietinimo trukmės, bet kalkiniai gaminiai dėl savo cheminės sudėties gali būti gerokai daugiau dujų už cementinius.

Galiausiai pateikiamos 6 išvados apie visų darytų eksperimentų rezultatus.

Baigiamojo darbo apimtis – 53 psl., 24 lentelės, 23 paveikslai, 43 literatūros šaltiniai.

Barauskas, Justas. Manufacturing of Lightweight Concrete 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 Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: concrete, lightweight concrete, carbonation, carbon dioxide, CO₂, concrete curing Kaunas, 2022. 53 pages.

Summary

The aim of this master's thesis is to make lightweight concrete using green technology by curing in CO₂ environment and to determine its properties. The tasks of this thesis are to produce lightweight foam concrete and to determine its mechanical and physical properties after curing in CO₂ environment, as well as to estimate the amount of CO₂ absorbed by concrete. Master's thesis consists of three main parts: literature analysis, composition of concrete and research methods, analysis of experimental results.

The analysis of literature describes the methods of production of lightweight concrete and materials required for its production. The basic principles of carbonization, its chemical reactions and carbonation methods were found out. The results of other research and possible influence of environment conditions have been analyzed.

In the following section making and compositions of lightweight foam concrete which is used in this work are given. Experiments were performed to select best concrete which will be used to continue testing. One composition with a cement binder and one composition with lime binder were chosen. In this section test methods and devices used are also described.

The results of experiments are analyzed in the third part of this work. Tests have shown that density of both compositions with cement and lime binder cured in CO₂ are always higher than the one cured in the air, due to the formation of calcium carbonate. Also tests have shown that, curing time has significant effect on the compressive strength of the concrete, but it's not worth to keep specimens in the curing chamber for too long, because effectiveness decreases as time goes. The average depth of carbonation indicated that only few hours of curing in CO₂ is enough, to achieve a greater carbonation than specimens which were stored in the air for 28 d. In this part of the work samples consumption of the CO₂ was estimated by two methods, density change method and titration method. It's found that the amount of CO₂ used is also highly dependent on the curing time, but specimens with lime binder can absorb more carbon dioxide than specimens with cement binder due to their chemical composition.

Finally 6 conclusions were made about results of all the experiments.

Master's thesis consists of 53 pages of text, 24 tables, 23 figures, 43 references.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros analizė.....	13
1.1. Betono gamybos tvarumas	13
1.2. Lengvasis betonas.....	13
1.2.1. Putų betonas.....	14
1.3. Betono kietinimas naudojant CO ₂	17
1.3.1. Veikimo principas	17
1.3.2. Kietinimo technologija	18
1.4. CO ₂ kietinimo įtaka betono savybėms	20
1.4.1. Vandens laidumas.....	20
1.4.2. Atsparumas aukštai temperatūrai	20
1.4.3. Įtaka chloridų prasiskverbimui	21
1.4.4. Mechaninės savybės	21
1.4.5. Atsparumas šalčio ciklams	21
1.4.6. pH lygis	21
1.5. Sąlygų įtaką karbonizacijai.....	22
1.5.1. Temperatūra.....	22
1.5.2. CO ₂ dujų koncentracija.....	22
1.5.3. CO ₂ dujų slėgis.....	22
1.5.4. Santykinė oro drėgmė.....	23
1.5.5. Vandens ir cemento santykis	23
1.6. CO ₂ dujų įsisavinimo įvertinimas.....	23
2. Bandinių sudėtis ir tyrimų metodika.....	25
2.1. Betono sudėtis ir gamyba	25
2.1.1. Cementinio lengvojo betono medžiagos, gamyba ir sudėties parinkimas.....	25
2.1.2. Kalkinio lengvojo betono medžiagos, gamyba ir sudėties parinkimas	28
2.2. Tyrimų metodologija.....	30
2.2.1. Betono kietinimo metodai	30
2.2.2. Betono gniuždymo stiprio nustatymas	31
2.2.3. Tankio nustatymas.....	32
2.2.4. Betono drėgno nustatymas	32
2.2.5. Karbonizacijos gylio nustatymas.....	32
2.2.6. Bandinių utilizuoto CO ₂ dujų kiekio apskaičiavimas.....	33
2.2.7. Rentgeno spindulių difrakcijos (XRD) analizė	33
3. Eksperimentų rezultatai ir jų analizė	34
3.1. Bandinių tankiai.....	34
3.1.1. Cementiniai gaminiai.....	34
3.1.2. Kalkiniai gaminiai	35
3.2. Gniuždymo stipris	36
3.2.1. Cementiniai gaminiai.....	36
3.2.2. Kalkiniai gaminiai	38

3.3. Bandinių utilizuoto CO ₂ kiekis.....	39
3.3.1. Cementiniai gaminiai.....	39
3.3.2. Kalkiniai gaminiai	41
3.4. Karbonizacijos gylis	42
3.4.1. Cementiniai gaminiai.....	42
3.4.2. Kalkiniai gaminiai	44
3.5. XRD analizė	45
3.5.1. Cementiniai gaminiai.....	46
3.5.2. Kalkiniai gaminiai	47
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Tankio klasės	14
2 lentelė. Stiprio gniuždant klasės.....	14
3 lentelė. Kalkių žymėjimai pagal LST EN 459-1 [9]	15
4 lentelė. Cementinio putų betono sudėtys, 1 m ³	25
5 lentelė. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių matmenys ir tankis.....	26
6 lentelė. Skirtingų sudėčių cementinių gaminių karbonizacijos gylis	27
7 lentelė. Kalkinio putų betono sudėtys, 1 m ³	28
8 lentelė. Skirtingų sudėčių kalkinių bandinių matmenys ir tankiai	30
9 lentelė. Cementinių gaminių ankstyvojo tankio kinetika.....	34
10 lentelė. Cementinių gaminių tankio po 28 parų kinetika	34
11 lentelė. Kalkinių gaminių ankstyvojo tankio kinetika.....	35
12 lentelė. Kalkinių gaminių tankio po 28 parų kinetika	35
13 lentelė. Cementinių gaminių ankstyvasis betono gniuždymo stipris	36
14 lentelė. Cementinių gaminių betono gniuždymo stipris.....	37
15 lentelė. Kalkinių gaminių ankstyvasis betono gniuždymo stipris.....	38
16 lentelė. Kalkinių gaminių betono gniuždymo stipris	39
17 lentelė. Cementinių gaminių sunaudoto CO ₂ kiekis	40
18 lentelė. Cementinių gaminių titravimo rezultatai.....	40
19 lentelė. Apskaičiuotas 7 d. CO ₂ + 21 d. ore kietintų cementinių gaminių sunaudoto CO ₂ kiekis	40
20 lentelė. Kalkinių gaminių sunaudoto CO ₂ kiekis	41
21 lentelė. Cementinių kalkinių titravimo rezultatai	41
22 lentelė. Apskaičiuotas 7 d. CO ₂ + 21 d. ore kietintų kalkinių gaminių. sunaudoto CO ₂ kiekis ...	41
23 lentelė. Cementinių gaminių vidutinis karbonizacijos gylis	42
24 lentelė. Kalkinių gaminių vidutinis karbonizacijos gylis.....	44

Paveikslų sąrašas

1 pav. Europos cemento asociacijos planas pasiekti CO ₂ neutralumą [2]	13
2 pav. CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ trikomponentė sistema, mineralai reaguojantys su CO ₂ [22]	17
3 pav. Standartinio kietinimo schema naudojant CO ₂ dujas [21]	19
4 pav. Kietinimo schema naudojant suspaustas CO ₂ dujas [21]	19
5 pav. Kietinimo schema su pratekančiomis CO ₂ dujomis [28]	20
6 pav. Santykinės drėgmės įtaka karbonizacijai [39].....	23
7 pav. Karbonizacijos lygis priklausomai nuo V/C santykio [41]	23
8 pav. Skirtingų sudėčių cementiniai bandiniai	26
9 pav. Skirtingų sudėčių cementinių gaminių gniuždymo stipris	28
10 pav. Skirtingų sudėčių kalkiniai bandiniai	29
11 pav. Kietinimo sąlygos CO ₂ aplinkoje	30
12 pav. Kietinimo sąlygos ore.....	31
13 pav. Gniuždymo presai „Toni Technik“	31
14 pav. Cementinių gaminių ankstyvasis betono tankis	35
15 pav. Kalkinių gaminių ankstyvasis betono tankis	36
16 pav. Cementinių gaminių ankstyvasis betono gniuždymo stipris	37
17 pav. Cementinių gaminių betono gniuždymo stipris.....	37
18 pav. Kalkinių gaminių ankstyvasis betono gniuždymo stipris.....	38
19 pav. Kalkinių gaminių betono gniuždymo stipris	39
20 pav. 7 d. CO ₂ + 21 d. ore kietintų cementinių bandinių rentgenograma.....	46
21 pav. 28 d. ore kietintų cementinių bandinių rentgenograma.....	46
22 pav. 7 d. CO ₂ + 21 d. ore kietintų kalkinių bandinių rentgenograma.....	47
23 pav. 28 d. ore kietintų kalkinių bandinių rentgenograma	48

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

CO₂ – anglies dioksidas;

CaCO₃ – kalcio karbonatas;

CaO – kalcio oksidas;

Ca(OH)₂ – kalcio hidroksidas;

C-S-H – kalcio hidrosilikatai;

C₃S – trikalcio silikatas;

C₂S – dikalcio silikatas;

C₃A – trikalcio aluminatas;

C₄AF – tetrakalcio aliumoferitas;

XRD – rentgeno spinduliuotės difrakcija.

Terminai:

Karbonizacija – medžiagos, veikiamos CO₂, vartimas karbonatais;

Portlanditas – hidroksidą turintis mineralas, kalcio hidroksidas;

Kalcitas – karbonatų klasės mineralas, kalcio karbonatas.

Ivadas

Temos aktualumas

Statybos sektorius yra vienas labiausiai aplinką teršiančių sektorių pasaulyje. Vien cemento gamybos metu išmetama apie 4 % pasaulinės CO₂ emisijos. Tačiau iki 2050 metų siekiama, kad cemento gamybos procesas būtų neutralus anglies dioksido išmetimo atžvilgiu. Be to, vis labiau populiarėja žalieji pastatai turintys LEED ar BREEAM sertifikatus. Statant tokius statinius yra labai svarbu įvertinti pastato gyvavimo ciklo parametrus, tarp jų ir medžiagų gamyboje išmetamą CO₂ kiekį. Todėl, kad išlaikyti betono, kaip statybinės medžiagos patrauklumą, siekiama sumažinti jo gamyboje išmetamo CO₂ kiekį. Šiam tikslui pasiekti nėra vieno sprendimo, jis reikalauja daug pokyčių cemento gamybos grandinėje, statybose, pastatų naudojime. Pradedant nuo atsinaujinančių energijos išteklių naudojimo, technologijų tobulinimo iki CO₂ surinkimo ir jo panaudojimo karbonizuojant betono gaminius. Šiuo metu yra atliekama daug tyrimų kaip būtų galima panaudoti įvairias atliekas betono gamyboje: perdirbta betoną, šlaką, pelenus ar CO₂ dujas. CO₂ dujų panaudojimas kietinant betoną nėra nauja tema, tačiau būtent apie lengvojo betono kietinimą nėra atlikta daug tyrimų. Todėl darbe nagrinėja anglies dioksido įtaka lengvojo betono mechaninėms ir fizikinėms savybėms, įvertinamas šiame procese bandinių sunaudotas dujų kiekis.

Darbo tikslas

Pagaminti lengvąjį betoną žaliosios technologijos būdu kietinant CO₂ aplinkoje ir nustatyti jo savybes.

Darbo uždaviniai

1. Apžvelgti mokslinę literatūrą apie lengvąjį betoną ir jo gamybos būdus bei gaminių kietinimo technologijas CO₂ aplinkoje.
2. Pagaminti lengvąjį putų betoną su cementiniu rišikliu ir nustatyti jo fizikines ir mechanines savybes kietinant įprastu būdu bei CO₂ aplinkoje.
3. Pagaminti lengvąjį putų betoną su kalkiniu rišikliu ir nustatyti jo fizikines ir mechanines savybes kietinant įprastu būdu bei CO₂ aplinkoje.
4. Nustatyti lengvojo betono gniuždymo stiprio priklausomybę nuo CO₂ kietinimo laiko.
5. Nustatyti ir apskaičiuoti CO₂ utilizavimo kiekius šiose dujose kietintuose bandiniuose.

Mokslinis naujumas

Pastaruoju metu vis daugiau tyrėjų atkreipia dėmesį į karbonizavimą, kaip galimybę sumažinti cemento gamybos metu išmesto anglies dioksido pėdsaką. Kol kas, šis metodas yra tyrimų stadijoje ir nėra plačiai taikomas betono pramonėje. Yra tiriama, kaip CO₂ gali paveikti mechanines ir fizikines betono savybes, kaip keičiasi jo cheminė sudėtis. Tačiau būtent lengvojo putų betono karbonizavimas yra labai mažai nagrinėta tema tiek Lietuvos, tiek užsienio mokslininkų.

Praktinis pritaikomumas

Darbe atlikti eksperimentai siekiant nustatyti betono su kalkių ir cemento rišikliais kietinto anglies dioksido aplinkoje fizikines ir mechanines savybes. Taip pat įvertinti optimalų kietinimo laiką, norint pasiekti tam tikrą gniuždymo stiprį ar įsisavinto CO₂ kiekį. Gauti rezultatai padeda suprasti karbonizacijos procesą, siekiant jį pritaikyti statybos pramonėje.

1. Literatūros analizė

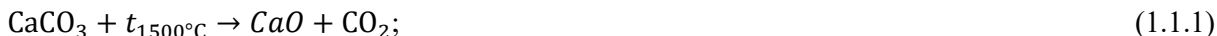
1.1. Betono gamybos tvarumas

Statybų sektorius per 2020 m. bendrai sukūrė net 38 proc. pasaulinės anglies dioksido dujų emisijos, teigia tarptautinė energetikos agentūra. Tik cemento gamybos metu išmesto CO₂ kiekis yra apie 4 proc. pasaulio CO₂ emisijos [1]. Siekiant stabdyti klimato kaitą tarptautinė energetikos agentūra yra užsibrėžusi statybų sektoriuje bei cemento gamyboje iki 2050 metų pasiekti neutralumą anglies dioksido atžvilgiu. Tam pasiekti yra sudarytas planas, kuriame įvertinama žaliųjų technologijų naudojimas, išmesto anglies dvideginio surinkimas, betono karbonizavimas.



1 pav. Europos cemento asociacijos planas pasiekti CO₂ neutralumą [2]

Yra apskaičiuota, kad šiuo metu 1 m³ 40 MPa stiprumo betono pagaminti yra išmetama apie 354 kg CO₂, iš jų net 76 procentus sudaro CO₂ išskirtas cemento gamybos metu [3]. Didelis išmetamų dujų kiekis susidaro dėl cemento gamybos technologijos, kadangi klintys yra degamos apytiksliai 1500 °C temperatūroje. Pasiiekti tokias aukštas temperatūras reikia didelio kiekio kuro bei degamos klintys taip pat išskiria CO₂ dujas pagal cheminę formulę:



Šio proceso cemento gamybos metu išvengti nepavyks, todėl yra ieškoma būdų kaip surinkti CO₂ ir jį panaudoti. Vienas iš būdų kaip sugražinti išmetamas dujas atgal į betoną, gali būti kietinimas CO₂ aplinkoje. Atlikti statinio gyvavimo ciklo įvertinimai įprastai kietinto betono ir CO₂ aplinkoje rodo, kad visuotinio atšilimo potencialas pastarųjų gaminių gali būti iki 30 % mažesnis [4]. Tai sudarytu reikšmingą įtaką siekiant neutralumo anglies dioksido atžvilgiu betono gamyboje.

1.2. Lengvasis betonas

Pagal LST EN 206-1 tai betonas, kurio tankis po išdžiovinimo yra 800–2000 kg/m³ [5]. Mažesnio tankio betoną galima pagaminti dviem būdais: naudojant įvairius lengvuosius užpildus arba panaudojant porodarius. Taip pat gali būti šie du lengvojo betono gaminimo būdai apjungti kartu. Betonai skirstomi pagal gniuždymo stiprį (žymėjimas LC) ir pagal tankį (žymėjimas D).

1 lentelė. Tankio klasės

Tankio klasė	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Tankis kg/m ³	801–1000	1001–1200	1201–1400	1401–1600	1601–1800	1801–2000

2 lentelė. Stiprio gniuždant klasės

Stiprio gniuždant klasė	Charakteristinis cilindrinis stipris f_{lck} (MPa)	Charakteristinis kubinis stipris $f_{lck,cube}$ (MPa)
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

1.2.1. Putų betonas

Putų betonas yra viena iš lengvojo betono rūšių, jo gamyboje naudojami putokšliai, kurie leidžia mišinyje išlaikyti oro tuštumas. Toks betonas pasižymi dideliu takumu, mažu svoriu, minimaliu kiekiu užpildų, nedideliu stipriu, geromis izoliacinėmis savybėmis. Atitinkamai nuo putokšlio kiekio, keičiasi betono tankis, tankio režiai yra labai platūs 400–1600 kg/m³. Naudojamas laikančioms konstrukcijoms, pertvaroms, šilumos izoliacijai [6]. Putų betono savybės labai priklauso nuo jam pagaminti naudojamų medžiagų proporcijų.

Rišamosios medžiagos

Kalkės

Pagal kietėjimo būdą kalkės skirstomos į orines ir hidraulinės. Lietuvoje dažniausiai naudojamos orinės kalkės, kadangi hidraulinės kalkės nėra gaminamos. Kalkės gaminamos degant kalcio karbonatą (CaCO₃), dažniausiai klintis, kreidą, dolomitinės klintis 850–1200 °C temperatūroje. Degimo metu atsiskiria CO₂ ir susidaro kalcio oksidas (CaO), kitaip vadinamas negesintos kalkės. Norint gauti hidratines kalkes (gesintas kalkes), jas reikia gesinti vandeniui, kad susidarytų kalcio hidroksidas (Ca(OH)₂). Priklausomai nuo išteklių, kalkės gali būti kalcitinės ir dolomitinės. Kalcitinės kalkės yra laikomos geresnėmis, kadangi kietėjant susidaro kristalinis kalcio hidroksidas, kalcio karbonatas, įvairaus bazingumo kalcio hidrosilikatai. LST EN 459-1 standarte nurodomi kalkių žymėjimai priklausomai nuo bendro kalcio ir magnio oksidų kiekio, taip pat ir nuo kalkių būvio, hidratinės kalkės žymimos S raide, negesintos kalkės – Q raide [7, 8, 9].

3 lentelė. Kalkių žymėjimai pagal LST EN 459-1 [9]

Kalkių tipas	Žymuo	Vertės pateikiamos kaip masės dalis procentais			
		CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃
Kalcitinės kalkės	CL90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2
	CL80	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2
	CL70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2
Dolomitinės kalkės	DL 90-30	≥ 90	≥ 30	≤ 6	≤ 2
	DL 90-5	≥ 90	> 5	≤ 6	≤ 2
	DL 85-30	≥ 85	≥ 30	≤ 9	≤ 2
	DL 80-5	≥ 80	> 5	≤ 9	≤ 2

Cementas

Tai hidraulinė rišamoji medžiaga, kuri savaime rišasi ir kietėja, gali surišti smulkius ir stambius užpildus į dirbtinį akmenį. Gaminama iš molio ir klintinių uolienuų mišinio, kuris yra degamas esant apytiksliai 1500 °C, gaunama medžiaga vadinama klinkeriu. Cementas gali būti gaminamas dviem būdais šlapiuoju arba sausuoju. Šlapiuoju būdu ruošiant įkrovą medžiagos yra malamos kartu su vandeniu, sausuoju būdu malamos jau išdžiovintos medžiagos. Šlapiuoju būdu gaminant betoną sunaudojama mažiau elektros energijos, naudojami paprastesni įrenginiai, tačiau šiuo būdu gaminant išskiriamos šilumos sąnaudos būna didelės – apie 5000–6700 kJ/kg. Gaminant sausuoju būdu šilumos sąnaudos sumažėja 2 ir daugiau kartų, dėl šios priežasties sausasis gamybos būdas yra kur kas populiariesnis. Dabartinių įrenginių šilumos sąnaudos sumažėjo iki mažiau nei 2900 kJ/kg klinkerio. Svarbiausi cemento mineralai yra alitas (C₃S), belitas (C₂S), trikalčio aliuminatas (C₃A), tetrakalčio aliumoferitas (C₄AF) [7, 10].

Pagal EN 197-1 standartą, cemento stiprumo klasės yra trys: 32,5 klasė, 42,5 klasė, 52,5 klasė, jos nurodo standartinį stiprį po 28 parų. Pagal ankstyvąjį stiprį šios klasės dalijamos į dar tris pogrupius: mažo ankstyvumo, žymima L raide, įprastinio ankstyvumo žymima, N raide, didelio ankstyvojo stiprio, žymima R raide [11].

Pagrindiniai cemento tipai:

- CEM I portlandcementis;
- CEM II sudėtinis portlandcementis;
- CEM III šlakinis cementas;
- CEM IV pucolaninis cementas;
- CEM V sudėtinis cementas.

Cementas yra populiariausias rišiklis gaminant putų betoną. Yra naudojamas įprastas portlandcementis, greitai kietėjantis portlandcementis, kalcio sulfoaluminatinis cementas, aluminatinis cementas, jie gali sudaryti nuo 25 iki 100 procentų rišiklio tūrio. Likusiai daliai galima panaudoti silicio dioksido mikrodulkes, lakiuosius pelenus, kalkes. Pakeitus dalį cemento šiomis medžiagomis galima pagerinti mišinio konsistenciją, padidinti ilgalaikį stiprį, sumažinti savikainą. Kiekviena pridėtinė medžiaga pakeičia vis skirtingas savybes [12].

E.P Kearsley kartu su P.J. Wainwrightu atliko tyrimą, kaip putų betoną paveikia panaudoti lakieji pelenai. Tirtuose bandiniuose buvo pakeista iki 75 % cemento masės lakiaisiais pelenais. Vandens ir cemento santykis visais atvejais buvo išlaikytas vienodas. Gauti rezultatai įrodo, kad nors ir betonui su lakiaisiais pelenais reikia ilgesnio laiko pasiekti maksimalų stiprį, tačiau jis gali būti didesnis negu naudojant tik įprastą cementą. Tokie rezultatai įrodo, kad galima pakeisti didelį kiekį cemento lakiaisiais pelenais, nesumažinant betono stiprio, bet sumažinant betono kainą [13].

Putokšlis

Pagaminti putų betoną yra naudojami putokšliai, kurie kontroliuoja betono tankį, sukurdami atitinkamą kiekį oro burbulų cemento mišinyje. Putų burbulai apibūdinami kaip oro tuštumos, susidariusios veikiant porodariui. Labiausiai paplitę putokšliai yra sintetiniai, baltymų pagrindu, hidrolizuoti baltymai, klijų muilas ir saponinas. Baltymų pagrindo putokšlis sukuria stipresnę ir uždaresnę oro burbulų struktūrą, tai leidžia įtraukti ir sulaikyti daugiau oro, o tuo tarpu sintetiniai pasižymi didesne plėtra, todėl sumažėja betono tankis [12]. Sintetiniai putokšliai tinkami betonui, kurio projektuojamas tankis 1000 kg/m^3 ir daugiau, baltymų pagrindu pagaminti putokšliai tinkami kai siekiamas betono tankis yra $400 - 1600 \text{ kg/m}^3$ [14].

Abiejų tipų putokšliai sumažina vandens paviršiaus įtempius, taip palengvina stabilių putų suformavimą. Sintetiniai putokšliai yra amfoterinė medžiaga, ji lengvai ištirpsta vandenyje. Tačiau naudojant sintetinius putokšlius svarbu atsižvelgti į jų suderinamumą su cemento dalelėmis, tai labai svarbu norint pasiekti atitinkamą įtraukto oro kiekį. Baltymų pagrindo putokšlis sukuria oro burbulus dėl baltymų irimo, nutrūkus didelių baltymų peptidiniams ryšiams susidaro daugiau mažų hidrofobiškų molekulių. Šis procesas sumažina paviršiaus įtempius, leidžia susidaryti oro burbulams, be to, reaguodamas vandenilis padeda sukurti stabilias putas. Baltymų pagrindu pagaminto putokšlio efektyvumas priklauso nuo temperatūros ir pH [15].

S. Varghese ir kiti mokslininkai siekė nustatyti kaip skirtingo tipo putokšliai paveikia betono savybes. Lyginant natūralų ir sintetinį putokšlį buvo nustatyta, kad betono stipris naudojant natūralų putokšlį yra didesnis. Toks betonas atlaiko didesnę tempimo jėgą bei jo tamprumo modulis yra didesnis [16]. D. Falliano taip pat lygino skirtingų tipų putokšlius bei gavo, kad gniuždymo stipris yra didesnis betono naudojant baltymų pagrindo porodarį. Tokius rezultatus mokslininkas grindžia tuo, kad panaudojus sintetinį putokšlį, gautos putos yra kur kas stabilesnės, todėl su mažesniu putų ir cemento santykiu galima pasiekti norimą tankį. Tai nustato bendrą vandens + putų ir cemento santykį. Baltymų pagrindu putokšliu pagamintos putos nėra tokios stabilios, todėl jas pridėjus į mišinį, jame padidėja skysčio kiekis bet ne oro kiekis. Daromos išvados, kad betono stipris priklauso ne tik nuo vandens ir cemento santykio bet ir nuo oro ir cemento santykio [17].

Vandens poreikis

Vandens poreikis priklauso nuo rišiklio, užpildų ar reikalingų betono savybių. Dėl mažo vandens kiekio gaunami standūs mišiniai, nyksta oro tuštumos. Didelis vandens kiekis gali sukelti medžiagų atsiskyrimą. Putų betonui vandens ir cemento santykis yra rekomenduojamas nuo 0,4–1,25, priklausomai kokių savybių betoną norimą pagaminti. Naudojamas vanduo turi būti švarus, geriamas, kadangi jo kokybė gali neigiamai paveikti putokšlio veikimą, tai ypač svarbu baltymų pagrindo putokšliams [18].

Mišinio gamyba

Putų betoną galima gaminti dviem būdais, maišant putas atskirai arba maišant putas bendrai mišinyje. Abejais metodais galima pagaminti kokybišką putų betoną.

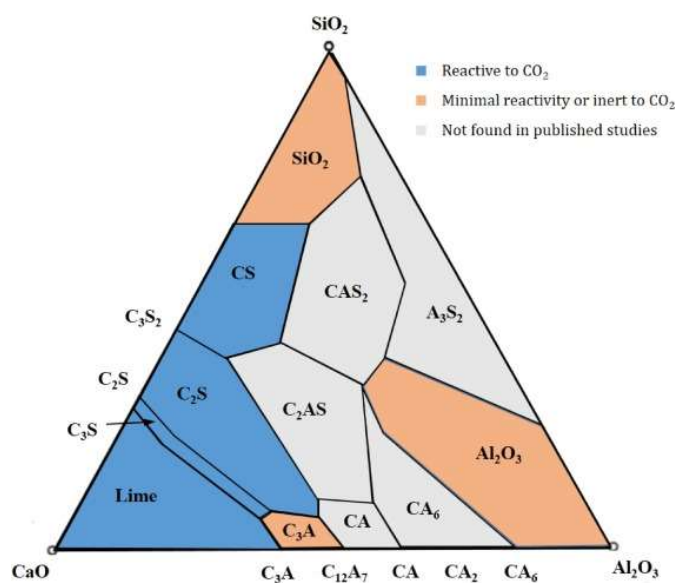
Pirmuoju metodu atskirai maišant putas, jos pagaminamos kitame inde ir pridamos į jau paruoštą mišinį. Šiam metodui naudojamos putos gali būti pagamintos dviem būdais: drėgnu arba sausu. Drėgnu metodu putų tirpalas purškiamas per smulkų tinklėlį, susidariusių burbulų dydis svyruoja tarp 2–5 mm ir yra mažiau stabilūs nei pagaminti sausu metodu. Sausu metodu tirpalas yra purškiamas per didelio tankio užkardas ir tuo pačiu leidžiant suslėgtą orą į maišymo indą. Šiuo būdu gautų putų dydis yra mažesnis nei 1 mm, jos yra labai stabilios [19]. Antruoju metodu putokšlis ir visos kitos betono sudedamosios medžiagos maišomos kartu viename inde. Vanduo, esantis mišinyje maišymo metu reaguoja su putokšliu ir gaunamos putos. Dažniausiai gaminti putas pasirenkamas pirmasis metodas, nes sunaudojama mažiau putokšlio, jo kiekis tiksliau atspindi oro kiekį mišinyje.

Gaminant putų betoną labai svarbu naudoti stabilias putas, kad betonai galėtų atlaikyti savąjį svorį iki kol prasidės kietėjimo procesas. Atliktuose bandymuose ištirta, kad maišymo laikas turi didelę įtaką putų stabilumui, įtrauktam oro kiekiui. Nustatyta, kad pasiekus maksimalų įtraukto oro kiekį, tolimesnis maišymas paskatina oro kiekio putose sumažėjimą, nes oro burbulai jungiasi tarpusavyje ir gaunamos mažiau stabilios putos [20].

1.3. Betono kietinimas naudojant CO₂

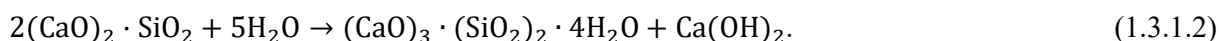
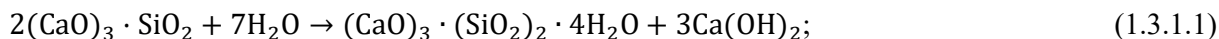
1.3.1. Veikimo principas

Kai betonai yra veikiamas CO₂ natūralioje aplinkoje ar koncentruoto CO₂ aplinkoje, dujos per paviršiaus defektus, poras, plyšius prasiskverbia į vidų, kur reaguoja su betone esančiais mineralais. Anglies dioksidas reaguoja ne tik su cemento hidratacijos produktais (Ca(OH)₂ ir C-S-H) bet ir klinkerio mineralais (C₃S, C₂S) [21].

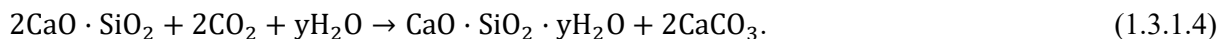
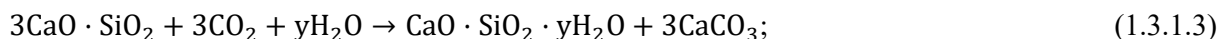


2 pav. CaO-SiO₂-Al₂O₃ trikomponentė sistema, mineralai reaguojantys su CO₂ [22]

Kad CO₂ galėtų reaguoti su cemento hidratacijos produktais pirmiausia turi prasidėti klinkerio mineralų hidratacijos procesas:



Yra žinoma, kad klinkerio mineralai alitas 3CaO · SiO₂ (C₃S) ir belitas 2CaO · SiO₂ (C₂S) reaguoja su CO₂ pagal pateiktas lygtis:



Kalcio silikatai reaguodami su CO₂ sudaro kalcio hidrosilikatą (CaO · SiO₂ · yH₂O arba C-S-H) ir kalcio karbonatą (CaCO₃). Normalios hidratacijos metu vietoje kalcio karbonato susidaro kalcio hidroksidas (Ca(OH)₂). Tolesnė C-S-H karbonizacija pagreitina Ca⁺ pašalinimą, reakcijos metu gaunama silikagelis (SiO₂) ir CaCO₃ [22]:



Gaunami šie kalcio karbonato mineralai – kalcitas, aragonitas, vateritas. Kalcitas dažniausiai gaunamas karbonizuojant C₃S ir β – C₂S išimtiniais atvejais gali susiformuoti aragonitas. Karbonizuojant γ – C₂S gaunama ir kalcitas, ir vateritas [22].

Betono stiprumui didesnę įtaką turi β – C₂S dėl susidariusio C-S-H gelio. Anglies dioksidu kietinant γ – C₂S nesusidaro C-S-H gelis su stipriomis Van Der Valso jėgomis, tačiau jis sugeria dvigubai daugiau CO₂ lyginant su β – C₂S [23].

1.3.2. Kietinimo technologija

Bandinių paruošimas

Vienas iš faktorių efektyviam pagreitintam karbonizacijos procesui vykti yra vandens kiekis bandinyje, todėl svarbu juos tinkamai paruošti. Jeigu bandiniai iš karto po betono išpylimo į formą bus dedami į kietinimo kamerą, jų karbonizacijos lygis bus labai žemas, kadangi CO₂ dujų prasiskverbimo greitis vandens prisotintose porose yra maždaug 10000 kartų mažesnis nei neprisotintose porose [24]. Paruošimas vyksta bandiniams pradėjus kietėti, juos išimant iš formų ir suteikiant didesnę paviršiaus plotą vandeniui išgaruoti, tokiu būdu optimalus drėgnumas bus pasiektas greičiau. Dažniausiai šis procesas vykdomas 20–25 °C temperatūroje, kai santykinė drėgmė apie 40–60 % [24]. Bandinių paruošimo laikas didelės įtakos neturi, svarbiausia yra sumažinti drėgmės kiekį, tačiau dėl per greito vandens išgaravimo betonas gali supleišėti [25].

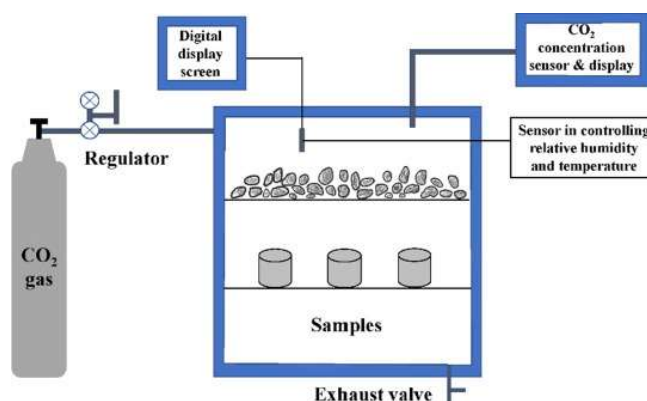
Drėgmės kiekio įtaką CO₂ įsisavinimui lengvajam betonui tyrė A. Zakiras. Darbe tiriami 4 atvejai su drėgnais, sausais, drėgnų ir sausų užpildų mišiniu ir džiovintų bandinių prieš CO₂ kietinimą. Pastebėta, kad naudojant sausus užpildus galima pasiekti geresnę anglies dvideginio įsisavinimą, nei naudojant drėgnus mišinius, kadangi jie sugeria drėgmę iš pačio mišinio. Tačiau didžiausias CO₂ įsisavinimas nustatytas, papildomai ventiliatoriumi džiovintų bandinių, kur drėgmės kiekis buvo

mažiausias. Pažymima, kad nors ir karbonizacijai svarbus mažas vandens ir cemento santykis, bet po karbonizacijos papildomai šlapinant bandinius ir sugrąžinant dalį vandens, galima pasiekti didesnę stiprumą, patvarumą, vykstant vėlyviems hidratacijos procesams [26].

Karbonizacija

Standartinis kietinimo metodas

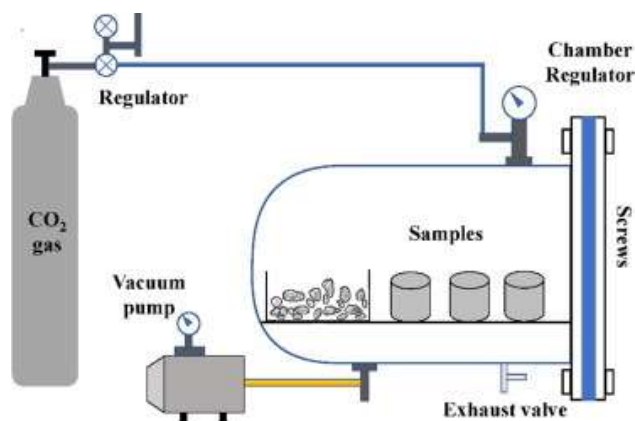
Naudojant standartinį CO₂ kietinimo metodą bandiniai yra dedami į kamerą, kurioje yra atmosferos slėgio anglies dvideginis, tačiau didesnės koncentracijos. Šio metodo technologinė schema pateikta 3 pav. Atliekant bandymą, kietinimo kameroje palaikoma 20±2 °C temperatūra, santykinė drėgmė – 70±5 % ir CO₂ koncentracija – 20±5 %. Šis metodas yra mažiausiai efektyvus, todėl bandymo laikas turėtų būti ilgesnis. Tačiau atlikti bandymą nereikia ypatingų prietaisų, todėl metodas yra pakankamai patikimas ir nesudėtingas [21].



3 pav. Standartinio kietinimo schema naudojant CO₂ dujas [21]

Kietinimo metodas naudojant suspaustas CO₂ dujas

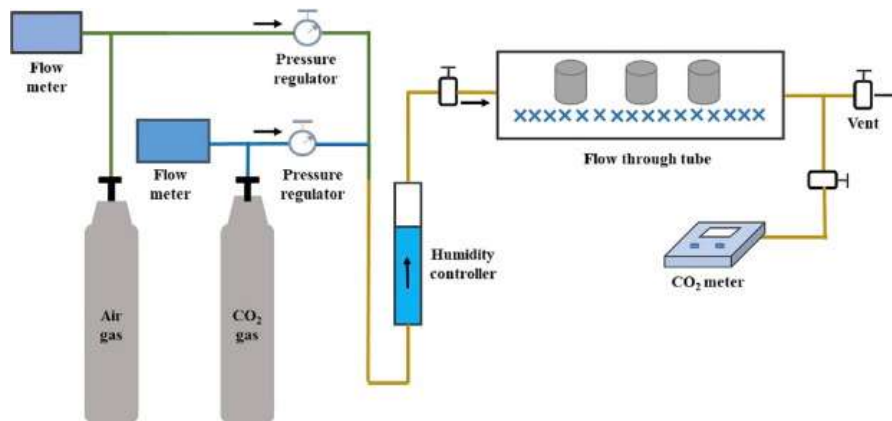
Pasiekti efektyvesnę CO₂ įsisavinimą yra sukuriamas didesnis slėgis kietinimo kameroje. Taikant šį metodą tiek anglies dvideginio slėgis, tiek koncentracija yra didesnė nei natūraliai vykstančios karbonizacijos. Bandymo metu naudojami prietaisai pavaizduoti 4 pav. Prieš įleidžiant dujas į kamerą, joje vakuumo pompa sukuriamas neigiamas slėgis apie -0,6 Bar, o CO₂ dujų slėgis kontroliuojamas dujų reguliatoriumi. Tai dažniausiai tyrimams atlikti naudojamas metodas, kadangi jo efektyvumas yra didžiausias [27].



4 pav. Kietinimo schema naudojant suspaustas CO₂ dujas [21]

Kietinimo metodas naudojant pratekančias CO₂ dujas

Taikant šį metodą kitaip nei prieš tai buvusiuose, dujos nuolat teka ir yra pašalinamos priešingoje kameros pusėje nei įtekėjo. Tokiu metodu galima reguliuoti temperatūrą, drėgmę, CO₂ dujų koncentraciją ir tekėjimo greitį. Prieš leidžiant dujas į kietinimo kamerą jos pirmiausiai yra sumaišomos su oru. Santykinė dujų drėgmė gali būti kontroliuojama naudojant Mg(NO₃)₂, NaCl ir K₂SO₄ tirpalus [28]. Atlikti tyrimai rodo, kad šis metodas yra pakankamai efektyvus ir nedaug nusileidžia kietinimui suspaustose dujose. Toks kietinimo metodas leidžia pasiekti geresnį karbonizacijos efektyvumą su mažesnėmis energijos sąnaudomis lyginant su standartiniu kietinimu naudojant CO₂ dujas [29].



5 pav. Kietinimo schema su pratekančiomis CO₂ dujomis [28]

Po kietinimo CO₂ dujomis

Tęsti kietinimą naudinga vandenyje ar aukšto santykio drėgnumo aplinkoje (daugiau nei 95 %), taip užtikrinant galimybę vyksti vėlyvesniems hidratacijos procesams. Kadangi bandinių paruošimo metu buvo pašalinta dalis vandens, o po karbonizacijos reakcijos liks dar nesureagavusių klinkerio mineralų. Tai naudinga ne tik dėl galimo pasiekti didesnio betono stiprio gniuždant, bet ir padės sugražinti karbonizacijos metu prarastą šarmingumą [21].

1.4. CO₂ kietinimo įtaka betono savybėms

1.4.1. Vandens laidumas

X. Panas ir kt. tyrė paviršiaus apdorojimo CO₂ įtaką vandens laidumui. Daug betono irimo problemų gali būti siejamos su silpnu paviršiaus sluoksniu, todėl yra taikomi įvairūs paviršiaus apdirbimai. Bandymo metu tirti dviejų tipų mišiniai su 0,3 V/C ir 0,4 V/C, jie buvo kietinami 3 h ir 6 h. Vandens laidumas, lyginant su įprastu betonu, sumažėjo apie 15–30 % priklausomai nuo kietinimo trukmės. Panašūs rezultatai gauti ir vandens garų perdavimui. Tai lemia viršutinio sluoksnio porų sumažėjimas, dėl kurio po CO₂ kietinimo paviršiaus struktūra sutankėjo [30].

1.4.2. Atsparumas aukštai temperatūrai

Y. Mengas ir kt. tyrė kaip pasikeičia betono, veikiamo aukštos temperatūros, savybės po kietinimo CO₂ aplinkoje. Šiame darbe buvo įvertinta bandinių su įvairiais cemento ir vandens santykiais, jie buvo veikiami nuo 300 °C iki 800 °C temperatūros. Tokie temperatūros režimai pasirinkti, nes buvo nustatyti trys pagrindiniai medžiagų savybių pablogėjimo etapai. Esant 100–300 °C išgaruoja

kapiliarinis vanduo, vyksta dehidracija, esant 400–500 °C – portlandito CH virtimas į laisvasias kalkes ir esant 600–800 °C – C-S-H ir CaCO₃ irimas. Pagal bandymo metu gautus rezultatus autoriai daro išvadą, kad kietinimas CO₂ aplinkoje pagerina betono atsparumą aukštai temperatūrai, tam įtakos daugiausia turi kietinimo metu susiformavęs kalcio karbonatas [31].

1.4.3. Įtaka chloridų prasiskverbimui

D. Zhangas ir Y. Shao atliktame moksliniame tyrime siekė nustatyti CO₂ kietinto betono atsparumą chloridams. Bandymo metu tirti du skirtingi bandiniai, vienas su įprastu cementu, kitas su dalimi lakiųjų pelenų. Gauti bandymo rezultatai įrodo, kad gaminiai ankstyvoje stadijoje paveikti CO₂ yra atsparesni trumpalaikiam ir ilgalaikiam chloridų poveikiui. Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu nustatyta, kad po karbonizacijos betono struktūra buvo tankesnė. Anglies dvideginis nusėdo, kaip kristalinės formos kalcio karbonatas ir susimaišęs su C-S-H sukūrė mažiau pralaidžią struktūrą. Tai galioja tiek bandiniams su įprastu cementu, tiek su dalimi lakiųjų pelenų. Nurodoma, kad CO₂ kietinimas gali sumažinti armatūros korozijos riziką ar atitolinti korozijos pradžią, jūros zonoje naudojam gelžbetonyje [12, 32].

1.4.4. Mechaninės savybės

D. Sharma kartu su S. Goyalu atliko bandymus, kuriuose lygino mechanines savybes vandenyje kietinto betono ir CO₂ kietinto betono. Šiuo bandymu buvo nustatyta, kad anglies dioksido kietinto betono stipris buvo apie 30 % didesnis, nei vandenyje kietėjusio. Didžiausias skirtumas tarp stiprių pastebimas ankstyvoje stadijoje, praėjus daugiau laiko stipriai supanašėja, tačiau vis tiek CO₂ kietinto betono išlieka didesnis. Karbonizuoto betono atsparumas abraziškai taip pat yra didesnis, tačiau kitaip nei gniuždymo stipris, jis po kiek laiko nesupanašėja ir visada išlieka didesnis [33].

1.4.5. Atsparumas šalčio ciklams

D. Zhangas ir Y. Shao taip pat tyrė kaip kietinimas CO₂ aplinkoje paveikia betono atsparumo šalčiui savybes. Nustatyta, kad įgautas didesnis ankstyvas stiprumas padidina atsparumą tempimo įtempimams ir įtrūkėjimams, kuriuos sukelia ledo išsiplėtimas kristalizacijos metu. Be to, CO₂ kietintame betone sumažėja kapiliarinių porų, kurias galėtų užpildyti vanduo. Kapiliarinių porų dydis vykstant karbonizacijai vienodėja, didesnės nei 10 nm poros mažėja, o 3–10 nm poros didėja, kadangi mažiau porų gali užšalti, atsparumas šalčiui didėja [34].

1.4.6. pH lygis

Betoną kietinant CO₂ jo pH lygis mažėja, todėl yra rizika, kad tokiame betone gali prasidėti armatūros korozija. A. Zakiras ir Y. Shao tyrimo metu nustatinėjo, kaip pasikeičia betono vandenilio jonų koncentracija bandinių laikytų anglies dioksido aplinkoje, lyginant su ore laikytais gaminiais. Gauti rezultatai parodė, kad išorės sluoksnių labiau veikiamų anglies dioksido pH lygis po 8 val. kietinimo gali sumažėti iki 9,1, bandinio viduryje iki 11,6. Tačiau buvo nustatyta, kad leidžiant vykti vėlyviems hidratacijos procesams ir laikant bandinius drėgnoje aplinkoje pH lygis atsistato į įprastai ore, ar vandenyje kietinto betono lygį, išorės sluoksniuose 12, viduryje 12,8. Sumažinti armatūros korozijos rizikai reikalingas pH lygis yra 11,6, todėl autoriai teigia, kad toks betonas galėtų būti armuotas [35].

1.5. Sąlygų įtaką karbonizacijai

1.5.1. Temperatūra

Yra ieškoma įvairių būdų kaip padidinti CO₂ karbonizacijos efektyvumą, vienas iš jų galėtų būti oro temperatūros didinimas reakcijos metu. D. Wangas su kolegomis siekė įvertinti ar temperatūra yra svarbus veiksnys karbonizacijos efektyvumui. Bandymas buvo vykdomas 1 valandą laikant bandinius CO₂ kameroje skirtingose temperatūrose. Nustatyta, kad temperatūra karbonizacijos efektyvumą gerina iki apytiksliai 100 °C, toliau didinant temperatūra iki 300 °C karbonizacijos laipsnis mažėjo. Tai nutinka nes 100 °C temperatūroje greitai išgaruoja reakcijai vykti reikalingas vanduo ir karbonizacija nebevyksta. Daroma išvada, kad optimaliai parinkta aukšta temperatūra padidina karbonizacijos proceso efektyvumą, tačiau per aukštą temperatūrą šį procesą stabdo. Kadangi vandens kiekis yra svarbiausias veiksnys, buvo atliktas dar vienas bandymas, kurio metu praėjus pusei kietinimo laiko, buvo papildomai įpilta vandens, kad reakcija galėtų tęstis. Pagal gautus rezultatus, lyginant įprastai 20 °C temperatūroje kietintus gaminius, su gaminiais kietintais 100 °C temperatūroje, pastarųjų karbonizacijos lygis padidėjo 7 kartus [36].

1.5.2. CO₂ dujų koncentracija

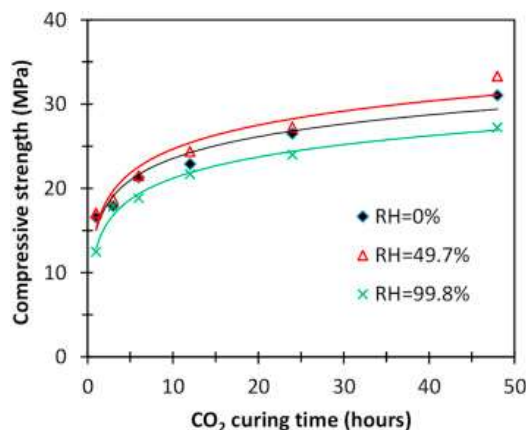
Dujų koncentracija turi nemažą įtaką kietinimo proceso greičiui ir efektyvumui. Kuo didesnė CO₂ dujų koncentracija kameroje, tuo procesas bus efektyvesnis. Taip yra todėl, kad mažesnė dujų koncentracija reiškia mažesnę dujų prasiskverbimą į gaminį, tai tiesiogiai paveikia reakcijos laipsnį. Tačiau su mažesne dujų koncentracija taip pat galima pasiekti tokį pat karbonizacijos laipsnį, tik kietinimo laikas turi būti atitinkamai ilgesnis. Kuo bandinių kietinimo laikas ilgėja, tuo CO₂ dujų koncentracijos įtaka mažėja, kadangi pasiekiamas didesnis karbonizacijos lygis ir vykstančios reakcijos lėtėja [37].

1.5.3. CO₂ dujų slėgis

S. Ahmadas ir kiti atliko tyrimą, kuriame aiškinosi kokią įtaką turi CO₂ slėgis ir kietinimo laikas betono savybėms. CO₂ slėgis buvo didinamas 69 kPa žingsniu nuo 69–414 kPa (10–60 psi). Nustatyta, kad ilgiausiai (10 h) ir didžiausiame slėgyje (414 kPa) kietinto bandinio gniuždymo stipris ir įsisavinto CO₂ kiekis buvo didžiausias. Kiekvieno bandinio, kuris kietinimo kameroje buvo laikytas ilgiau ir didesniame slėgyje savybės buvo geresnės už prieš tai buvusio, galima daryti išvadą, kad slėgis padeda vyksti karbonizacijos procesams. Tačiau gniuždymo stiprio prieaugis ilgiau kietinant vis mažėjo, todėl po kiek laiko procesas nebus toks efektyvus, bandymo metu po 10 val. stiprio prieaugis jau nebuvo reikšmingas [38].

1.5.4. Santykinė oro drėgmė

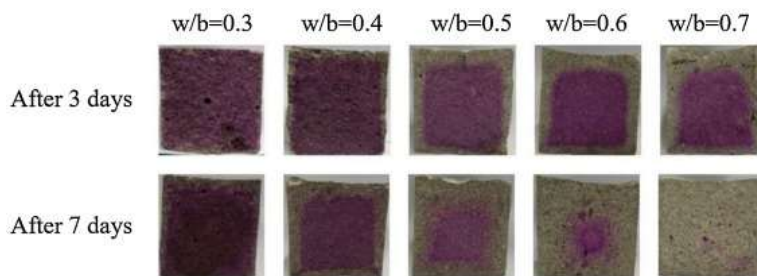
Santykinė oro drėgmė turi didelę įtaką CO₂ kietinimo procesui. Oro drėgmė gali sulėtinti CO₂ dujų difuziją, bet suteikia drėgmės karbonizacijos reakcijai vykti. Bandymais nustatyta, kad optimalus oro drėgnumas yra 50–65 %, didesnė drėgmė stipriai sumažina betono gniuždymo stiprį [39, 40].



6 pav. Santykinės drėgmės įtaka karbonizacijai [39]

1.5.5. Vandens ir cemento santykis

Kaip ir įprastai kietintame betone vandens ir cemento santykis turi didelę įtaką gniuždymo stipriui. Tačiau priešingai nei įprastai, didesnis santykis lemia didesnę laikomąją galią. Didesnis vandens ir cemento santykis leidžia geriau vykti CO₂ difuzijai, tai nulemia didesnę karbonizavimo laipsnį ir didesnę gniuždomąją galią. Be to, didesnis vandens kiekis, pagal 1.3.1 skyriuje pateiktas lygtis, leidžia efektyviau alitui ir belitui reaguoti su anglies dioksido dujomis [41].



7 pav. Karbonizacijos lygis priklausomai nuo V/C santykio [41]

1.6. CO₂ dujų įsisavinimo įvertinimas

Karbonizacijos efektyvumą galima įvertinti šiais kriterijais:

- karbonizacijos gyliu;
- įsisavintų dujų kiekiu;
- karbonizacijos laipsniu.

Karbonizacijos laipsnis gali būti aprašomas kaip santykis tarp anglies dioksido paveikto ploto ir likusio ploto iki kurio CO₂ dujos nepateko. Karbonizuotas plotas nustatomas perskėlus bandinį ir jį apipurškus fenolftaleino tirpalu. Fenolftaleino indikatorius parodo pH lygį bandinyje, kai pH yra mažesnis už 8,2 tirpalas bus bespalvis ir betonas nenusidažys, jeigu pH didesnis už 8,2, ta bandinio

dalis tampa avietinės spalvos. Pagal tai, koks plotas išlieka bespalvis, nustatomas karbonizacijos gylis ir apskaičiuojamas karbonizacijos laipsnis pagal formulę [42]:

$$\text{Karbonizacijos laipsnis} = \frac{A_{CO_2}}{A} \cdot 100 \% ; \quad (1.6.1)$$

čia A_{CO_2} – plotas paveiktas CO_2 dujų, mm^2 ;

A – bendras skerspjūvio plotas, mm^2 .

Įsisavintų dujų kiekį galima įvertinti masės prieaugio arba termogravimetrinės analizė būdais.

Masės prieaugio metodu įvertinama kiek bandinio masė padidėjo nuo pradinės masės prieš pradendant CO_2 kietinimą. Skaičiuojant šiuo metodu turi būti įvertinamas ir proceso metu išgaravęs vanduo. Sunaudoto anglies dioksido dujų kiekis skaičiuojamas pagal formulę [24]:

$$CO_2 = \frac{M_2 + M_w - M_1}{M_c} \cdot 100 \% ; \quad (1.6.2)$$

čia M_1 – masė prieš CO_2 kietinimą, g;

M_2 – masė po CO_2 kietinimo, g;

M_w – išgaravusio vandens masė, g;

M_c – rišiklio masė, g.

Termogravimetrinės analizės būdu įvertinamas karbonatų skilimas esant tam tikrai temperatūrai. Yra žinoma, kad masės mažėjimas vyksta nuo $550\text{ }^\circ\text{C}$ iki $1000\text{ }^\circ\text{C}$ laipsnių temperatūroje. Pagrindė tai vyksta, nes CO_2 atsiskiria nuo kalcio karbonatų ir lieka tik kalcio oksidas. Dėl šios priežasties įsisavintas CO_2 gali būti apskaičiuojamas pagal formulę [24]:

$$CO_2 = \frac{M_3 - M_4}{M_c} \cdot 100 \% ; \quad (1.6.3)$$

čia M_3 – masė $550\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje, g;

M_4 – masė $1000\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje, g;

M_c – rišiklio masė, g.

Norint apskaičiuoti karbonizacijos laipsnį pagal CO_2 suvartojimą, reikia įvertinti maksimalų galimą cemento CO_2 įsisavinimo kiekį, tai galima padaryti pagal Steinour formulę:

$$CO_{2MAX} = 0,785(X_{CaO} - X_{SO_3}) + 1,091X_{MgO} + 1,420X_{Na_2O} + 0,935X_{K_2O}; \quad (1.6.4)$$

Čia įvertinami procentiniai oksidų kiekiai cemente, teoriškai viena tona cemento galėtu sunaudoti pusę tonos CO_2 .

Tuomet karbonizacijos laipsnis įvertinamas [24]:

$$\text{Karbonizacijos laipsnis} = \frac{CO_2}{CO_{2MAX}} \cdot 100 \% ; \quad (1.6.5)$$

Turint karbonizacijos laipsnį galima daryti išvadą, kaip efektyviai vyko kietinimo procesas.

2. Bandinių sudėtis ir tyrimų metodika

2.1. Betono sudėtis ir gamyba

Bandymui atlikti buvo gaminti dviejų tipų betonai: su cementiniu rišikliu ir su kalkiniu rišikliu. Kiekvienam iš šių tipų buvo paruoštos kelios sudėtis, iš jų pasirinkta viena, platesnei CO₂ įtakai nustatinėti. Sudėtys buvo vertinamos pagal kelis kriterijus: tankį, karbonizacijos efektyvumą, gniuždomojo stiprio pokytį tarp ore ir CO₂ laikytų bandinių.

2.1.1. Cementinio lengvojo betono medžiagos, gamyba ir sudėties parinkimas

Cementinio putų betono sudėčiai parinkti pagamintos trys skirtingos sudėtys su skirtingais kiekiais kvarcinio smėlio. Smėlio kiekį pasirinkta keisti, norint gauti skirtingų tankių, struktūros bandinius. Bandant įvairias sudėtis iškilo problema dėl per lėto rišimosi, kai betonai sukrisdavo arba per lėtai kietėdavo ir būdavo sudėtinga išardyti kubelių formas nesugadinus bandinių. Išspręsti šią problemą pavyko panaudojus skystą stiklą bei gipsą.

4 lentelė. Cementinio putų betono sudėtys, 1 m³

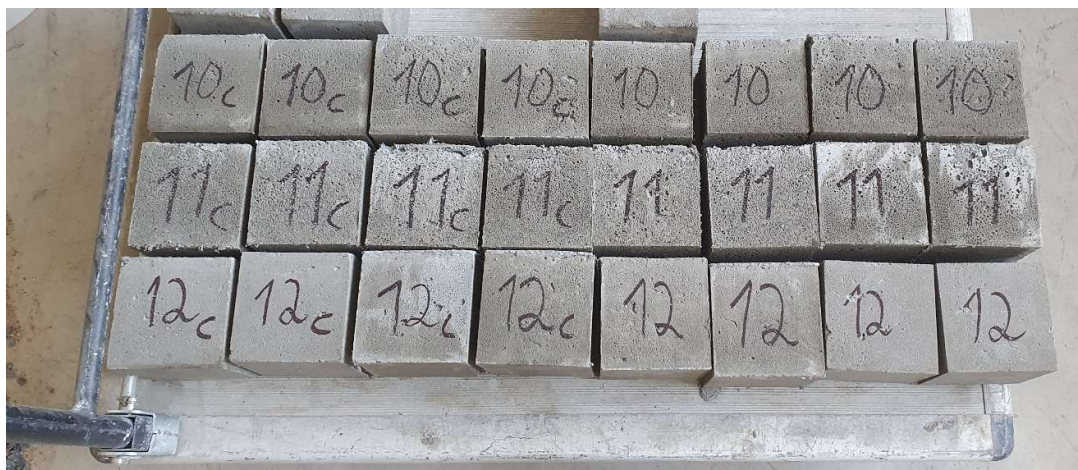
Medžiaga, kg	Sudėtis Nr. 10	Sudėtis Nr. 11	Sudėtis Nr. 12
Portlandcementis CEM I 42,5R	250	250	250
Vanduo	155	155	155
Kvarcinis smėlis fr. 0,0/0,4	750	500	1000
Gipsas	1,15	1,15	1,15
Skystas stiklas	2	2	2
Putokšlis Sika® SB2	1,25	1,25	1,25
Polipropileno fibros	0,30	0,30	0,30

Parinktas rišiklis portlandcementis CEM I 42,5 R, dėl didesnio ankstyvojo stiprio, kadangi bandiniai taip pat bandomi anksčiau nei po 28 d. Putų betone nėra naudojami stambūs užpildai, o kaip smulkus užpildas naudojamas kvarcinis smėlis fr. 0,0/0,4. Labai smulkus smėlis nesėda formuojant gaminius ir nesugadina struktūros. Naudojamas baltymų pagrindo putokšlis „SIKA SB2“, putos ruošiamos su rankiniu maišytuvu. Putų kokybei užtikrinti yra labai svarbu naudoti švarų vandenį, šiuo atveju naudotas geriamas vanduo iš miesto vandentiekio sistemos. Pagreitinti betono rišimosi pradžia naudojami skystas stiklas (silicio rūgšties natrio druska) ir gipsas, taip betonai nespėja subliūkti ir išlaiko savo formą kietėjant. Be to, naudojamos ir polipropileno fibros.

Visos sudėtys maišomos vienodai, nekeičiant eiliškumo ir laiko.

Mišinio maišymo technologija:

1. Atsveriama reikalingi kiekiai visų naudojamų medžiagų;
2. Į pusę paruošto vandens pilamas putokšlis ir maišoma apie 1 min, kol gaunamos stabilios putos;
3. Atskirame inde sausai išmaišoma cementas ir smėlis, gipsas ir fibros;
4. Supilamas likęs vanduo;
5. Maišoma iki vientisos masės, supilamos putos ir maišoma dar 20 s;
6. Supilamas skystas stiklas, maišoma 10 s.



8 pav. Skirtingų sudėčių cementiniai bandiniai







Iš 4 lentelės išrinkta viena sudėtis, su kuria buvo tęsiami bandymai. Sudėtis parinkta pagal kelis kriterijus: tankį, karbonizacijos efektyvumą, gniuždomojo stiprio pokytį tarp ore ir CO₂ kietintų bandinių. Parinkimui buvo pagaminti visų trijų sudėčių gaminiai, kurių dalis palikti kietėti ore, kita dalis įdėta į CO₂ dujų kamera. Po 28 d. kietėjimo atitinkamomis sąlygomis buvo atlikti tyrimai nustatyti minėtus parametrus.

5 lentelė. Skirtingų sudėčių cementinių bandinių matmenys ir tankis

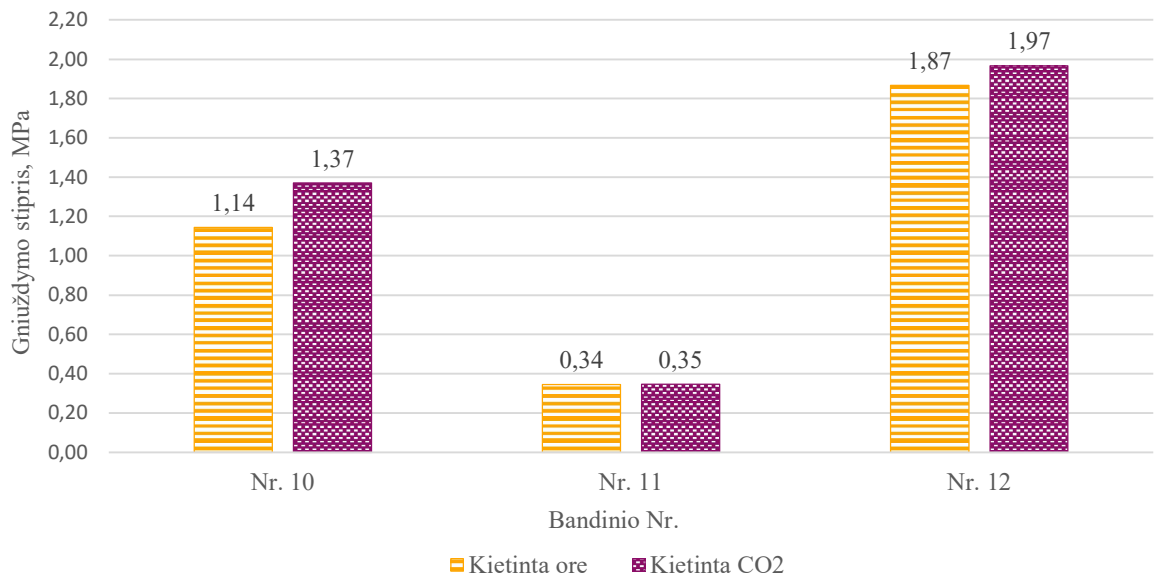
Sudėtis	a, mm	b, mm	h, mm	Svoris, kg	Tankis. kg/m ³
Bandiniai kietinti ore					
Nr. 10	101,71	98,78	100,52	0,879	870,78
Nr. 11	100,42	100,61	100,97	0,614	602,30
Nr. 12	100,06	101,76	101,11	1,033	1002,62
Bandiniai kietinti CO₂					
Nr. 10	100,61	100,15	98,95	0,897	900,04
Nr. 11	100,66	100,77	101,64	0,656	636,18
Nr. 12	100,05	101,59	101,20	1,069	1038,73

Visų bandinių tankiai gauti mažiau 2000 kg/m³ ir atitinka lengvojo betono sąvoką. Tankiai atitinkamai nuo sudėties buvo 900 kg/m³, 600 kg/m³, 1000 kg/m³. Lyginant ore ir CO₂ laikytų bandinių tankio skirtumą, matome, kad visų sudėčių tankio prieaugis kietinant CO₂ yra panašus 30 – 36 kg/m³. Šis skirtumas nurodo, kiek CO₂ dujų sugėrė bandiniai, kadangi kietinimo laikas ir cemento kiekis bandiniuose buvo vienodas tai ir sunaudoto anglies dioksido kiekis panašus. Daroma išvada, kad bandinių struktūra įtakos neturėjo, galima spręsti, kad visų bandinių savybės įsisavinti CO₂ dujas yra vienodos.

6 lentelė. Skirtingų sudėčių cementinių gaminių karbonizacijos gylis

Sudėtis	Kietinti ore	Kietinti CO ₂
Nr. 10		
Nr. 11		
Nr. 12		

Pagal karbonizacijos gylį nustatymą naudojant fenolftaleino indikatorius galima spręsti, kad visuose bandiniuose po 28 d. CO₂ kietinimo įvyko pilna karbonizacija. Ore kietintų gaminių karbonizacija įvyko tik viršuje buvusio paviršiuje, kituose paviršiuose karbonizacija beveik neįvyko, dėl mažesnio oro kiekio. Vidutinis karbonizacijos gylis priklausomai nuo sudėties viršuje buvusio ore kietintų bandinių paviršiaus yra: Nr. 10 – 10,7 mm, Nr. 11 – 15,1 mm, Nr. 12 – 12,9 mm. Labiausiai buvo paveikta Nr. 11 sudėtis, tačiau gerokai mažiau, nei bandinių kietintų CO₂ kameroje, galima spręsti, kad šis procesas ore efektyviai nevyksta net ir porėtuose gaminiuose.



9 pav. Skirtingų sudėčių cementinių gaminių gniuždymo stipris

Nustačius gniuždymo stiprį gauta, kad didžiausias stiprio pokytis tarp ore ir anglies dioksido aplinkoje laikytų bandinių buvo Nr. 10 sudėtyje, net 19,7 proc., Nr. 11 sudėtyje įtakos beveik nebuvo, o Nr. 12 sudėtyje skirtumas 5,3 proc. Tęsti bandymus pasirinkta su Nr. 10 sudėtimi, dėl optimalaus tankio ir didžiausio stiprio pokyčio tarp ore ir CO₂ kietintų bandinių.

2.1.2. Kalkinio lengvojo betono medžiagos, gamyba ir sudėties parinkimas

Lengvojo betono su kalkių rišikliu sudėtis buvo parinkta pagal bandinių tankį, mišinio technologinį darbingumą. Rišikliui naudojant negesintas kalkes arba gesintu kalkių ir cemento mišinį. Dėl mišinio technologinio darbingumo rišiklio ir vandens santykis yra parinktas didesnis nei cementinių gaminių.

7 lentelė. Kalkinio putų betono sudėtys, 1 m³

Medžiaga, kg	Sudėtis Nr. 5	Sudėtis Nr. 13	Sudėtis Nr. 15
Negesintos Kalkės CL 90-Q	163	–	–
Gesintos Kalkės CL 90-S	–	175	175
Portlandcementis CEM I 42,5R	–	75	75
Vanduo	275	163	170
Kvarcinis smėlis fr. 0,0/0,4	375	750	750
Skystas stiklas	–	–	2
Putokšlis Sika® SB2	1,25	1,25	1,25
Polipropileno fibros	0,30	0,30	0,30

Šiose sudėtyse rišiklis naudojamas CL 90-Q arba CL 90-S kalkės maišytos su portlandcemenčiu CEM I 42,5R. Naudojant negesintas kalkes sudėtinga pagaminti putų betoną, kadangi vykstant gesinimosi procesui putos praranda stabilumą. Kitose sudėtyse nuspręsta naudoti gesintas kalkes, tačiau naudojant vien tik jas, bandiniai neįgauna pradinio stiprumo ir jų neįmanoma išformuoti nesugadinus. Todėl naudojamas gesintų kalkių ir portlandcemenčio mišinys. Mišinį sudaro 30 proc. cemento, kuris užtikrina pradinį gaminių stiprį. Kaip ir cementiniuose gaminiuose naudojamas toks pats kvarcinis

smėlis ir putokšlis „Sika SB2“. Vienoje sudėtyje siekiant pagerinti mišinio technologinį darbingumą, naudojamas didesnis vandens kiekis bei skystas stiklas.

Visos sudėtyms maišomos vienodai, nekeičiant eiliškumo ir laiko.

Mišinio maišymo technologija naudojant negesintas kalkes:

1. Į pusę paruošto vandens pilamas putokšlis ir maišoma apie 1 min., kol gaunamos stabilios putos;
2. Atskirame inde sausai išmaišomos negesintos kalkės, smėlis ir fibros;
3. Supilamas likęs vanduo;
4. Maišoma iki vientisos masės, supilamos putos ir maišoma 20 s;
5. Supilamas skystas stiklas, maišoma dar 10 s.

Mišinio maišymo technologija naudojant gesintas kalkes ir cementą:

1. Į pusę paruošto vandens pilamas putokšlis ir maišoma apie 1 min., kol gaunamos stabilios putos;
2. Atskirame inde sausai išmaišomos gesintos kalkės, cementas, smėlis ir fibros;
3. Supilamas likęs vanduo;
4. Maišoma iki vientisos masės, supilamos putos ir maišoma 20 s;
5. Supilamas skystas stiklas, maišoma dar 10 s.



10 pav. Skirtingų sudėčių kalkiniai bandiniai

Pakeitus nedidelę dalį kalkių cementu, su betonu buvo kur kas lengviau dirbti. Cementas taip pat padidino trumpalaikį betono stiprį, todėl po paros laiko visi bandiniai buvo pakankamai tvirti ir juos buvo galima išformuoti. Naudojant tik kalkes pakankamas stipris buvo pasiekiamas tik po dviejų dienų.

8 lentelė. Skirtingų sudėčių kalkinių bandinių matmenys ir tankiai

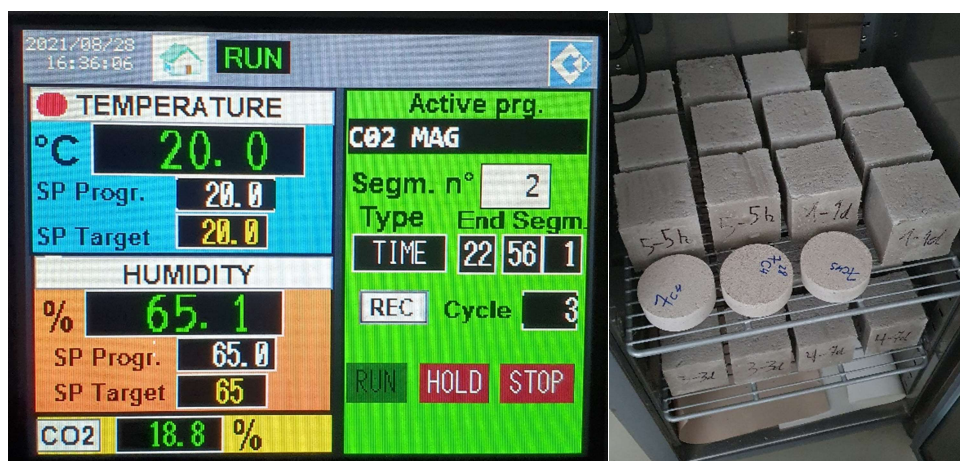
Sudėtis	a, mm	b, mm	h, mm	Svoris, g	Tankis. kg/m ³
Nr. 5	100,52	99,75	99,96	498,6	497,46
Nr. 13	100,46	100,72	102,21	931,4	900,61
Nr. 15	100,85	100,53	100,27	969,9	954,08

Tęsti bandymus pasirinkta su 13 sudėtimi, dėl panašaus tankio į cementinius gaminius bei lengvo mišinio technologinio darbingumo lyginant su kitomis sudėtimis.

2.2. Tyrimų metodologija

2.2.1. Betono kietinimo metodai

Pagaminti bandiniai kietinami skirtingose aplinkose: ore ir koncentruoto anglies dioksido dujų. Kiekvienos maišymo partijos dalis kubelių buvo palikti ore, dalis įdėta į CO₂ kamerą. Kameroje buvo palaikoma 20 °C temperatūra, santykinis drėgnumas – 65 %, anglies dioksido koncentracija – 19 %.



11 pav. Kietinimo sąlygos CO₂ aplinkoje

CO₂ aplinkoje bandiniai buvo laikomi 5 val., 1 d., 3 d., 7 d., Tokie intervalai pasirinkti siekiant nustatyti kaip keičiasi betono mechaninės savybės nuo kietinimo laiko bei kiek laiko reikia pasiekti pilną bandinių karbonizaciją. Praėjus nustatytam laikui dalis bandinių buvo perskelti ir sugniuždyti iškart, taip nustatant ankstyvąjį betono stiprį ir tuo metu pasiektą karbonizacijos gylį. Kita dalis bandinių buvo palikti kietėti ore iki 28 d, kad pasiektų pilną stiprį ir tik tada sugniuždyti bei dar karta perskelti, įvertinti kaip keičiasi karbonizacijos gylis. Ore laikyti bandiniai 20±5 °C temperatūroje, santykinis drėgnumas – 55±5 %.



12 pav. Kietinimo sąlygos ore

2.2.2. Betono gniuždymo stiprio nustatymas

Betono gniuždymo stipriui nustatyti buvo pagaminti 100x100x100 dydžio kubeliai pagal LST EN 12390-1:2021 reikalavimus. Standartų skirtų būtent putų betono gniuždymo stipriui nėra, todėl naudojami LST EN 12390-3:2019 ir LST EN 679:2006 standartai. Pagal pastarąjį standartą kubeliai buvo apkraunami $0,1 \pm 0,05$ MPa per sekundę greičiu, kol bandinys suyra. Stiprio nustatymas pagal LST EN 12390-3:2019:

$$f_c = \frac{F}{A_c}; \quad (2.2.2.1)$$

čia f_c – gniuždymo stipris, MPa;

F – maksimali apkrauta jėga, N;

A_c – skerspjūvio plotas, mm^2 .



13 pav. Gniuždymo presai „Toni Technik“

2.2.3. Tankio nustatymas

Tankiui nustatyti pirmiausia bandiniai išmatuojami pagal LST EN 12390-1:2021 ir apskaičiuojamas tūris m^3 , jis suapvalinamas iki keturių reikšminių skaitmenų. Bandinių masė buvo nustatyta tokių, kokie gauti sveriant juos svarstyklėmis, galima paklaida yra 1 gramas. Pagal LST EN 12390-7 tankis apskaičiuojamas:

$$D = \frac{m}{V}; \quad (2.2.3.1)$$

čia D – tankis, kg/m^3 ;

m – bandinio masė bandymo metu, kg ;

V – konkrečiu metodu nustatytas tūris, m^3 .

2.2.4. Betono drėgnio nustatymas

Sugniuždžius bandinius nustatomas faktinis drėgnis džiovinant 105 ± 5 °C temperatūroje iki pastovios masės. Po džiovinimo bandiniai iš kart turi būti pasveriami, kol neprasidėjo jų drėgnio kitimas. Absolūtus masės drėgnis pagal LST EN 1353:2000 apskaičiuojamas:

$$\mu_m = 100 \cdot \frac{m_{hu} - m_{dry}}{m_{dry}}; \quad (2.2.4.1)$$

čia μ_m – absoliutus masės drėgnis, g ;

m_{hum} – drėgno bandinio masė, g ;

m_{dry} – sauso bandinio masė, g .

2.2.5. Karbonizacijos gylis nustatymas

Karbonizacijos gylis nustatomas naudojant fenolftaleino indikatorių. Fenolftaleinas naudojamas nustatyti rūgštines ar bazines terpes, kai bandinio pH didesnis už 8,2 jis nusidažys rožine spalva (bazinė terpė), jeigu pH mažesnis už 8,2 bandinys bus bespalvis (rūgštinė terpė). Šį indikatorių naudojant galima nustatyti karbonizacijos gylį, kadangi CO_2 reaguoja su kalcio hidroksidu, kuris yra atsakingas už šarminės terpės išlaikymą betone. Bandymas atliekamas perskėlus kubelį per pusę su hidrauliniu presu, pjūklų pjauti kubelių negalima. Nuo atskeltos dalies nuvalomos dulkės, palaidos dalelės ir užpurškiamas indikatorius. Palaukus, kol spalvos nusistovi, išmatuojamas karbonizacijos gylis naudojant slankmatį. Metodika kaip nustatyti karbonizacijos gylį yra pateikta LST EN 12390-12:2020 standarte. Pagal gautus rezultatus gali būti apskaičiuojamas karbonizacijos laipsnis:

$$\text{Karbonizacijos laipsnis} = \frac{A_{CO_2}}{A} \cdot 100 \%; \quad (2.2.5.1)$$

čia A_{CO_2} – plotas paveiktas CO_2 dujų, mm^2 ;

A – bendras skerspjūvio plotas, mm^2 .

2.2.6. Bandinių utilizuoto CO₂ dujų kiekio apskaičiavimas

Įsisavintas anglies dioksido kiekis apskaičiuojamas pagal masės pokytį ore ir CO₂ aplinkoje kietintų gaminių. Anglies dioksido laiktų bandinių masė, teoriškai didėja, nes kalcio hidroksidas reaguodamas su CO₂ sudaro kalcio karbonatą, kurio tankis ir molinė masė yra didesnė. CO₂ aplinkoje kietintuose bandiniuose šio junginio susidaro, kur kas daugiau nei ore laiktų gaminių. Norint apskaičiuoti masės prieaugį, pirmiausiai nustatomi betono tankiai pagal 2.2.3 skyrių. Skaičiavimuose naudojami tankiai yra jau įvertinus bandinių drėgnį, kadangi skirtinguose kietinimo metoduose drėgnis kinta skirtingai ir gali įtakoti rezultatus. Turint ore ir CO₂ laiktų bandinių tankį, sunaudoto CO₂ kiekis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$CO_2 = \frac{M_2 - M_1}{M_c} \cdot 100 \%; \quad (2.2.6.1)$$

čia M_1 – masė prieš CO₂ kietinimą, g;

M_2 – masė po CO₂ kietinimo, g;

M_c – rišiklio masė, g.

Naudojant šią formulę gauname, procentinį įsisavinto CO₂ kiekį, pagal sudėtyje esančio rišiklio kiekį.

Įvertinti ar masės prieaugio metodu galima tiksliai nustatyti sunaudoto CO₂ kiekį, buvo naudotas titravimo metodas.

Pirmiausiai bandinys sutrinamas ir pasveriamas 1 g miltelių. Pasverti milteliai supilami į 250 ml kolbą, užpilami 150 ml distiliuoto vandens ir kaitinami apie 5 min. neleidžiant užvirti. Atvėsinus tirpalą į jį įlašinami 2–3 lašai 1 % fenolftaleino ir titruojama druskos rūgštimi, kol išnyks rausva spalva. Kalcio oksido kiekis esantis bandinyje apskaičiuojamas [43]:

$$A = \frac{V \cdot T_{CaO}}{m}; \quad (2.2.6.2)$$

čia V – titravimui sunaudotas druskos rūgšties kiekis, ml;

T_{CaO} – druskos rūgšties titras, išreikštas CaO kiekiu, $g \times 100$, $T_{CaO} = 2,804$ g/mol;

m – bandinio masė, g.

Turint kalcio oksido kiekį, apskaičiuojamas su CO₂ reagavusio CaO kiekį, pagal jo kiekio skirtumą ore ir anglies dioksido kietintų gaminių. Gavus reagavusio CaO kiekį, pagal junginių molio mases nustatomas utilizuoto CO₂ kiekis.

2.2.7. Rentgeno spindulių difrakcijos (XRD) analizė

Nustatyti ar tikrai įvyko karbonizacija buvo naudojama XRD analizė. Rentgeno spindulių difrakcija (XRD) yra rentgeno spindulių bangos ir dalelės dvilypumu paremtas kristalinių medžiagų struktūros analizės metodas. Šiuo metodu tiriant betoną, galima nustatyti jame esančius mineralus, tokius kaip kalcio hidrosilikatą, kalcio karbonatą, kalcio hidroksidą. Pagal rentgeno spindulių difraktogramos kreives įvertinama ar CO₂ aplinkoje kietintuose bandiniuose susidarė didesnis kiekis kalcio karbonato, nei kietintuose ore. Lyginant CO₂ ir ore kietintų bandinių kreivių pikus nustatoma ar karbonizacija įvyko bei jos efektyvumas. Vienodas kalcio karbonato kiekis rodytu, kad karbonizacija neįvyko, jeigu kalcio karbonato CO₂ kietintuose bandiniuose susidaro daugiau, reikštu, kad karbonizacija įvyko.

3. Eksperimentų rezultatai ir jų analizė

3.1. Bandinių tankiai

Tankiui nustatyti naudojama metodika pateikta 2.2.3 skyriuje. Bandinių tankis nustatinėjamas ore ir CO₂ aplinkoje kietintiems bandiniams, praėjus tam pačiam laiko intervalui nuo bandinių suformavimo. Ankstyvasis tankis buvo vertinamas praėjus 5 val., 1 d., 3 d. ir 7 d.. Kita dalis bandinių išėmus iš CO₂ kameros buvo palikta kietėti ore iki kol praeis 28 d. nuo suformavimo ir betonas pasieks pilną stiprį.

3.1.1. Cementiniai gaminiai

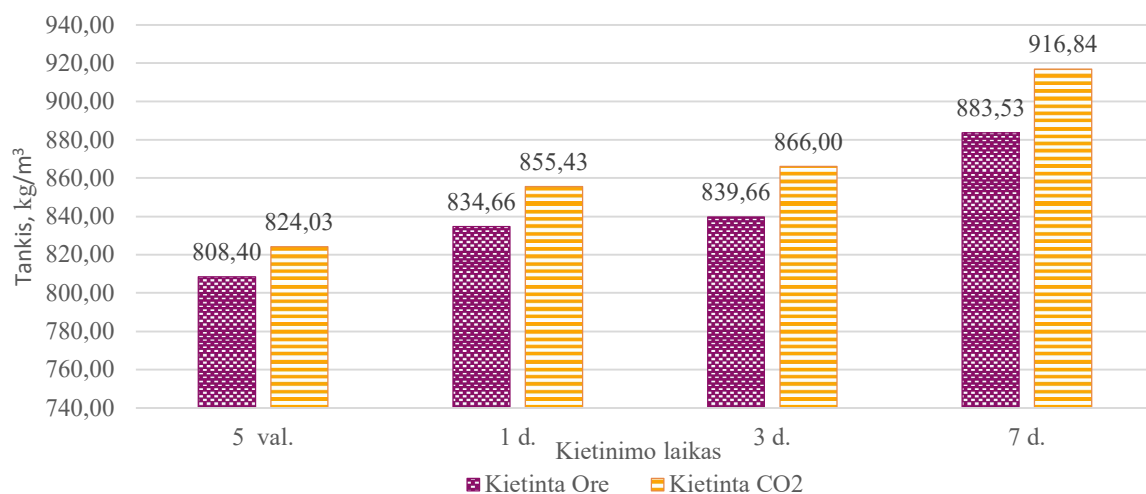
9 lentelė. Cementinių gaminių ankstyvojo tankio kinetika

Kietinimo aplinka	Kietinimo laikas	a, mm	b, mm	h, mm	Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Drėgnis, %	Tankis įvertinus drėgnį, kg/m ³
CO ₂	5 val.	101,06	98,76	101,51	881,7	870,30	5,32	824,03
	1 d.	101,03	101,04	100,61	922,7	898,43	4,79	855,43
	3 d.	100,20	100,18	100,62	909,4	900,37	3,82	866,00
	7 d.	100,17	98,92	101,06	939,3	938,05	2,26	916,84
Oras	5 val.	99,44	101,01	100,84	867,5	856,55	5,62	808,40
	1 d.	101,51	100,35	101,17	906,0	879,17	5,06	834,66
	3 d.	100,33	100,00	100,68	885,3	876,43	4,19	839,66
	7 d.	99,45	100,57	100,18	911,2	909,38	2,84	883,53

10 lentelė. Cementinių gaminių tankio po 28 parų kinetika

Kietinimo aplinka	Kietinimo laikas	a, mm	b, mm	h, mm	Svoris, g	Tankis, kg/m ³
CO ₂ + Oras	5 val. + 27 d.	99,22	100,62	101,10	870,8	862,81
	1 d. + 27 d.	100,06	100,11	100,56	913,1	906,54
	3 d. + 25 d.	101,17	100,32	100,50	943,4	924,90
	7 d. + 21 d.	101,09	99,03	100,17	959,7	956,95
Oras	28 d.	99,97	101,13	101,11	907,5	887,88

Pagal gautus rezultatus matome, kad bandinių kietintų CO₂ aplinkoje tankis yra didesnis už ore kietintų. Po 5 val. CO₂ karbonizuotų gaminių tankis buvo 1,9 % didesnis, atitinkamai po 1 d. – 2,5 %, 3 d. – 3,0 %, 7 d. – 3,6 %. Per 7 dienas iš viso ore kietintų bandinių tankis padidėjo 8,5 %, CO₂ kietintų 10,0 %. Karbonizuotų bandinių tankis didesnis dėl kalcio hidroksido vartimo kalcio karbonato mineralais, silikageliu. Pagal gautus tankius, galima spręsti, kad karbonizacija pavyko ir bandiniai įsisavino anglies dioksido dujas.



14 pav. Cementinių gaminių ankstyvasis betono tankis

3.1.2. Kalkiniai gaminiai

Bandiniams, kuriuose naudojamas kalkių rišiklis, taip pat buvo vertinama, kaip tankis keičiasi priklausomai nuo kietinimo laiko anglies dioksido aplinkoje. Metodika naudojama tokia pati, kaip ir cementiniams gaminiams, rezultatai pateikti toliau.

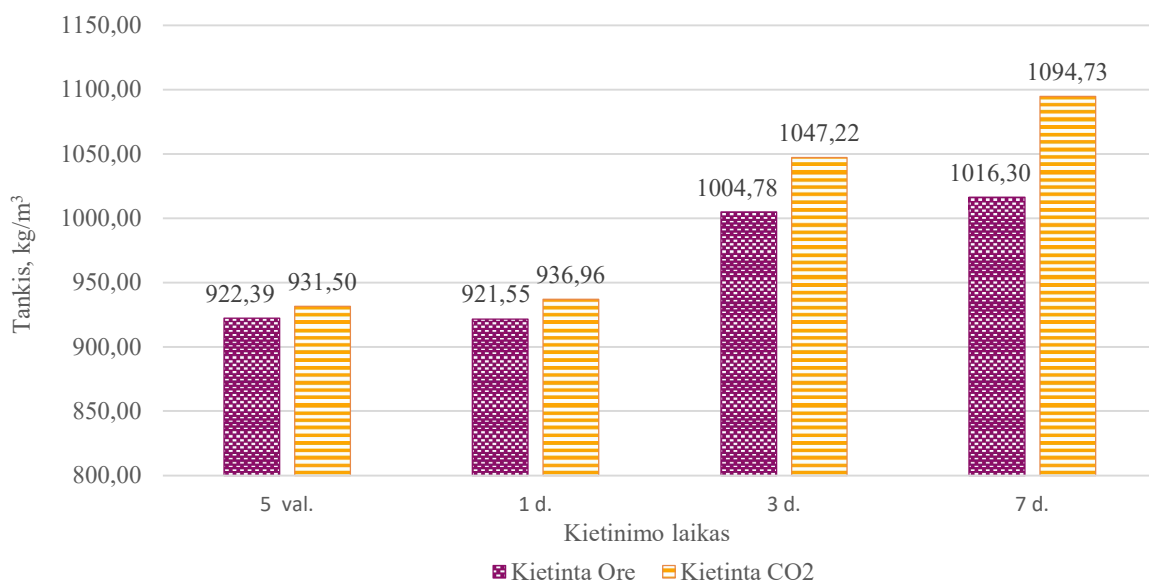
11 lentelė. Kalkinių gaminių ankstyvojo tankio kinetika

Kietinimo aplinka	Kietinimo laikas	a, mm	b, mm	h, mm	Svoris, g	Tankis, kg/m³	Drėgnis, %	Tankis įvertinus drėgnį, kg/m³
CO ₂	5 val.	100,93	100,54	99,84	1016,7	1003,54	7,18	931,50
	1 d.	100,97	100,45	100,87	1016,0	993,09	5,65	936,96
	3 d.	98,77	101,11	99,77	1083,8	1087,75	3,73	1047,22
	7 d.	100,97	100,84	101,27	1162,3	1127,30	2,89	1094,73
Oras	5 val.	100,27	100,85	101,44	1022,6	996,95	7,48	922,39
	1 d.	101,22	100,59	100,84	1002,7	976,63	5,64	921,55
	3 d.	100,90	100,48	101,27	1059,3	1031,79	2,62	1004,78
	7 d.	100,38	100,23	101,36	1056,2	1035,82	1,88	1016,30

12 lentelė. Kalkinių gaminių tankio po 28 parų kinetika

Kietinimo aplinka	Kietinimo laikas	a, mm	b, mm	h, mm	Svoris, g	Tankis, kg/m³
CO ₂ + Oras	5 val. + 27 d.	99,50	101,23	100,42	989,2	977,98
	1 d. + 27 d.	100,43	101,14	100,97	1015,0	989,79
	3 d. + 25 d.	100,71	97,35	100,24	1061,5	1080,14
	7 d. + 21 d.	100,96	101,10	100,41	1165,0	1136,76
Oras	28 d.	100,56	101,90	100,42	1019,6	990,90

Rezultatai rodo, kad bandinių kietintų anglies dioksido aplinkoje didėja, tačiau jis keičiasi ne taip tolygiai, kaip cementinių gaminių. Per pirmą dieną tankis buvo pastovus, o skirtumas tarp kietinimo būdų tik 1 proc., po 7 d. tankių skirtumas buvo apie 7 proc. Bendrai ore kietintų bandinių tankis per 7 d. padidėjo 10 proc., anglies dioksido aplinkoje apie 15 proc.



15 pav. Kalkinių gaminių ankstyvasis betono tankis

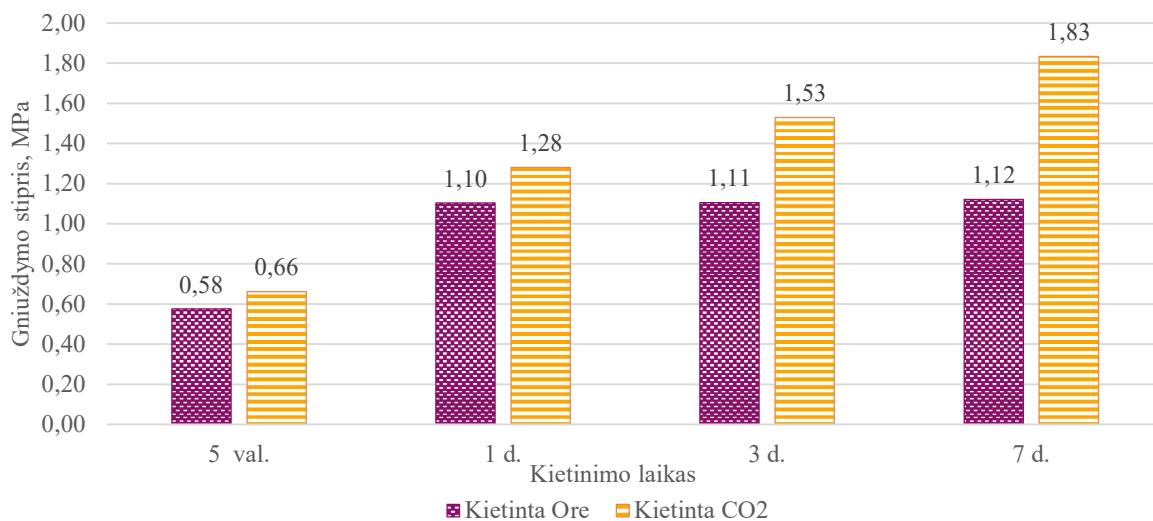
3.2. Gniuždymo stipris

Kaip ir tankis, betono gniuždymo stipris buvo nustatinėjamas ankstyvasis ir praėjus 28 d. po jų suformavimo. Bandiniai kietinimo kameroje laikyti 5 val., 1 d., 3 d., 7 d. Matuojant ankstyvąjį betono stiprį bandiniai kietinti tik CO₂ aplinkoje arba tik ore. Įprastam betono gniuždymo stipriui nustatyti buvo naudojamas mišrus kietinimo metodas, pradžioje bandinys kietinamas anglies dioksido aplinkoje atitinkamą laiką, vėliau išimamas ir paliekamas ore, kol bendrai bus pasiektas 28 d. kietinimo laikas.

3.2.1. Cementiniai gaminiai

13 lentelė. Cementinių gaminių ankstyvasis betono gniuždymo stipris

Kietinimo aplinka	Kietinimo laikas	Gniuždymo stipris, MPa
CO ₂	5 val.	0,66
	1 d.	1,28
	3 d.	1,53
	7 d.	1,83
Oras	5 val.	0,58
	1 d.	1,10
	3 d.	1,11
	7 d.	1,12

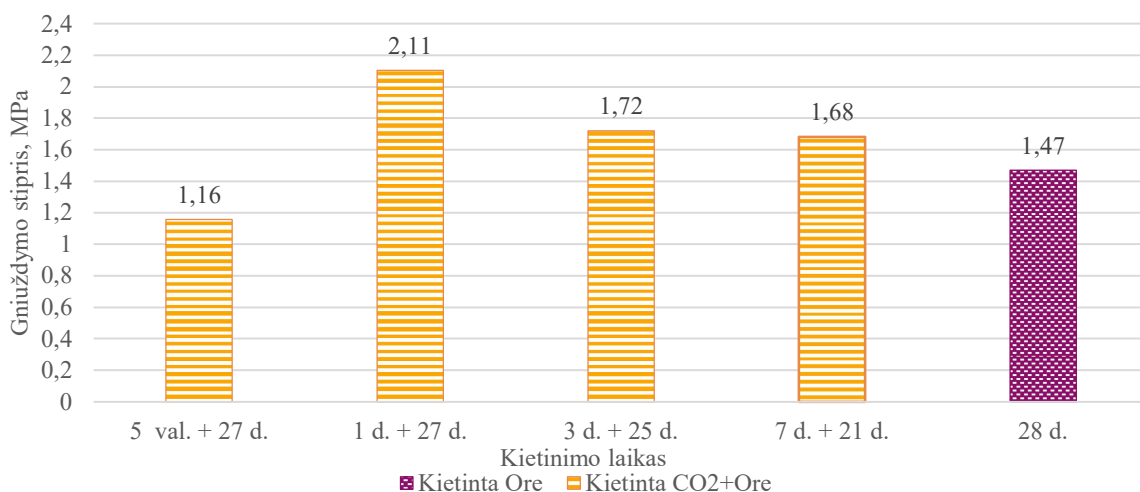


16 pav. Cementinių gaminių ankstyvasis betono gniuždymo stipris

Pagal aukščiau pateiktą grafiką matome, kad CO₂ kietinti bandiniai tik praėjus 5 val. jau turi pranašumą nuo buvusių ore, praėjus ilgesniam laikui šis skirtumas tik didėja. Ore laikytu bandinių stipris nusistovi jau po vienos dienos, pasiekus 1,1 MPa ir vėliau nekinta. Tai galima būtų sieti su naudojamu didelio ankstyvumo cementu, žymimu R raide. Kitaip, nei ore laikytų, anglies dioksido aplinkoje kietintų bandinių stipris tolygiai didėjo ir po 7 d. pasiekė 1,83 MPa. Gniuždymo stipris CO₂ aplinkoje kietintų gaminių atitinkamai buvo didesnis: po 5 val. – 13,1 proc., po 1 d. – 13,9 proc., po 3 d. – 27,7 proc., po 7 d. – 38,8 proc. Bendrai vertinant nuo 5 val. iki 7 d. ore laikytu gaminių stipris padidėjo du kartus, o CO₂ net tris kartus.

14 lentelė. Cementinių gaminių betono gniuždymo stipris

Kietinimo aplinka	Kietinimo laikas	Stipris, MPa
CO ₂ + Oras	5 val. + 27 d.	1,16
	1 d. + 27 d.	2,11
	3 d. + 25 d.	1,72
	7 d. + 21 d.	1,68
Oras	28 d.	1,47



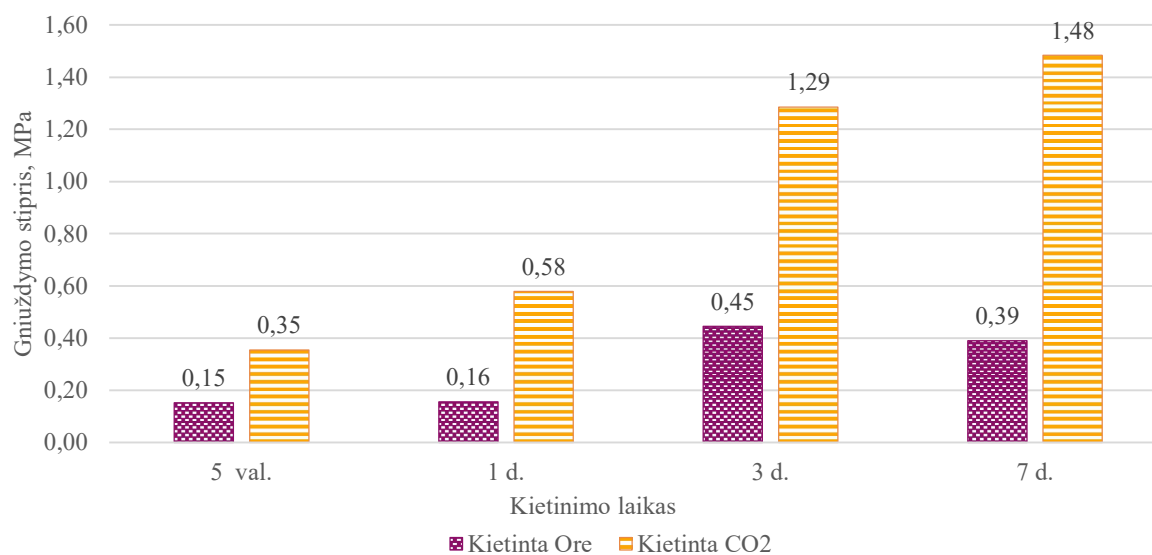
17 pav. Cementinių gaminių betono gniuždymo stipris

Siekiant įvertinti, kokią įtaką daro CO₂ kietinimas ilgalaikiam betono stipriui, buvo atliktas gniuždymo bandymas praėjus 28 d. po bandinių suformavimo. Gauti rezultatai pateikti 17 paveiksle. Didžiausias stipris gautas vieną dieną anglies dioksido aplinkoje laikytų gaminių – 2,11 MPa. Tris ir septynias dienas kietintų bandinių stipris suvienodėjo ir buvo mažesnis 1,7 MPa. Bandinių, kurie buvo laikyti 7 d. CO₂ dujų aplinkoje gautas gniuždymo stipris 1,68 MPa sumažėjo, lyginant su ankstyvuotu stipriu 1,83 MPa, Viena iš hipotezių kodėl tai galėjo įvykti, yra dėl susidariusio storo sluoksnio kalcio karbonato apvalkalo, kuris toliau vykstant hidratacijai, plečiantis mineralams, buvo suskaidytas ir pažeista betono struktūra.

3.2.2. Kalkiniai gaminiai

15 lentelė. Kalkinių gaminių ankstyvasis betono gniuždymo stipris

Kietinimo aplinka	Kietinimo laikas	Stipris, MPa
CO ₂	5 val.	0,35
	1 d.	0,58
	3 d.	1,29
	7 d.	1,48
Oras	5 val.	0,15
	1 d.	0,16
	3 d.	0,45
	7 d.	0,39

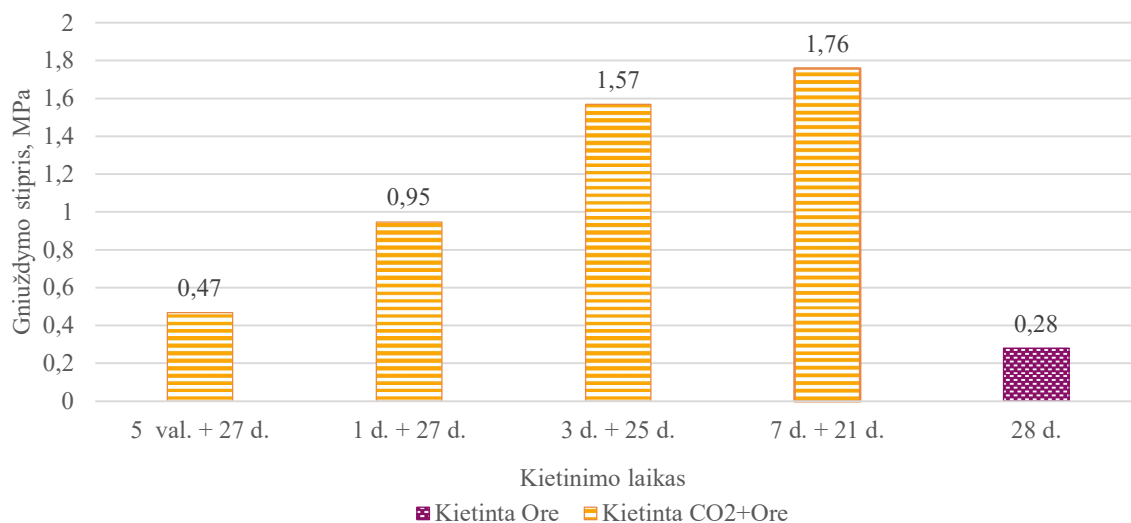


18 pav. Kalkinių gaminių ankstyvasis betono gniuždymo stipris

Bandiniams su kalkiniu rišikliu kietinimas CO₂ aplinkoje turėjo didesnę įtaką nei cementinių gaminių. Per pirmą dieną ore laikyti bandiniai pasiekė 0,16 MPa, o CO₂ 3 kartus daugiau. Jau per pirmas 5 val. stipris buvo 2 kartus didesnis. Po 3 d. ir po 7 d. stiprio skirtumas išlieka panašus, apie 3 kartus didesnis, nei ore laikytų gaminių. Kalcio hidroksidas reaguodamas su CO₂ sudaro kalcio karbonatą, kuris suteikia betonui stiprumo, tai galėtų paaiškinti, tokį skirtumą tarp rezultatų. Vertinant bendrai nuo 5 val. iki 7 d. gniuždymo stipris ore laikytu bandinių padidėjo apie 2,5 karto, o CO₂ aplinkoje kietintų bandinių – 3,8 karto.

16 lentelė. Kalkinių gaminių betono gniuždymo stipris

Kietinimo aplinka	Kietinimo laikas	Stipris, MPa
CO ₂ + Oras	5 val. + 27 d.	0,47
	1 d. + 27 d.	0,95
	3 d. + 25 d.	1,57
	7 d. + 21 d.	1,76
Oras	28 d.	0,28

**19 pav.** Kalkinių gaminių betono gniuždymo stipris

Po 28 d. betono gniuždymo stipris buvo didžiausias bandinių, kurie buvo laikyti CO₂ aplinkoje 7 d, gaminių stipris daugiau nei 6 kartus didesnis, už tik ore kietintų gaminių. Tai lemia per tą laiką susidaręs didesnis kalcio karbonato kiekis, nei gaminių kurie buvo trumpiau laikyti anglies dioksido aplinkoje arba laikyti tik ore. Vertinant, kokią įtaką kietinimo laikas turi betono stipriui, nustatyta, kad bandiniai 1 d. laikyti CO₂ yra apie 2 kartus stipresni už laikytus 5 val. Bandiniai, kurie buvo kietinami 3 d. daugiau nei 3 kartus stipresni už 5 val. kietintus, 7 d. laikyti apie 3,7 karto. Pagal rezultatus galima spręsti, kad efektyviausias kietinimo laikas kalkiniams gaminiams yra 3 d., nes stiprio pokytis stipriai sulėtėjo ir per keturias papildomas kietinimo dienas buvo tik 0,19 MPa didesnis.

3.3. Bandinių utilizuoto CO₂ kiekis

Bandinių utilizuoto CO₂ kiekis apskaičiuojamas dviem metodais. Masės pokyčio metodu ir titravimo metodu taip įvertinama, kad gauti rezultatai yra tikslūs ir teisingi.

3.3.1. Cementiniai gaminiai

Masės pokyčio metodas

Snaudoto CO₂ kiekis apskaičiuojamas pagal tankio pokytį ore ir CO₂ kietintų bandinių. Įvertinus drėgnį, gautas masės prieaugis, nurodo kiek anglies dioksido sureagavo su kalcio hidroksidu ir sudarė

kalcio karbonatą. Įvykus šiai reakcijai masė padidėja, nes kalcio karbonato tankis, molinė masė yra didesnė už kalcio hidroksido.

17 lentelė. Cementinių gaminių sunaudoto CO₂ kiekis

Kietinimo laikas	CO ₂ kietintų bandinių tankis, kg/m ³	Ore kietintų bandinių tankis, kg/m ³	Sunaudoto CO ₂ kiekis*, kg/m ³	Procentinė CO ₂ dalis nuo rišiklio masės, %
5 val.	824,03	808,40	15,63	6,25
1 d.	855,43	834,66	20,77	8,31
3 d.	866,00	839,66	26,34	10,54
7 d.	916,84	883,53	33,31	13,32

* – aritmetiškai apskaičiuotas skirtumas tarp CO₂ kietintų bandinių tankio ir ore kietintų bandinių tankio.

Pagal gautus rezultatus matome, kad vienas kubas penkias valandas kietėjusio betono įsisavino 15,63 kg CO₂, tai yra apie 6 proc. nuo sudėtyje esančios cemento masės. Praėjus vienai dienai, buvo įsisavinta 20,77 kg/m³, 5 kg/m³ daugiau, nei per pirmas 5 val. Po 7 d. kietinimo išviso sureagavo 33,31 kg/m³ CO₂, tai yra apie 13 proc. nuo cemento masės. Iš rezultatų matome, kad daugiausia anglies dioksido buvo sunaudota per pirmas 5 val. kietinimo, kuo ilgiau bandiniai laikyti kietinimo kameroje, tuo reakcija vis lėtėjo. Per paskutines 4 d. sunaudota 6,97 kg/m³ CO₂, apie 2,2 karto mažiau nei tik per pirmas 5 val. Daroma išvada, kad pirmosiomis valandomis karbonizacija vyksta efektyviausiai.

Titravimo metodas

Šis metodas naudojamas tik įsitikinti ar masės pokyčio metodo rezultatai yra teisingi, todėl sunaudoto anglies dioksido kiekis tik ilgiausiai kietintiems gaminiams. Skaičiavimai atlikti pagal 2.2.6.2 formulę.

18 lentelė. Cementinių gaminių titravimo rezultatai

Kietinimo metodas	Mėginio masė, g	Druskos rūgšties kiekis, ml	CaO procentinė dalis, %	Bandinio tankis, kg/m ³	CaO kiekis bandiniuose, kg/m ³
28 d. ore	1,004	2	5,59	887,88	49,59
7 d. CO ₂ + 21 d. ore	1,005	0,2	0,59	956,95	5,34

Iš gautų rezultatų, galima apskaičiuoti, kokį kiekį CO₂ utilizavo bandiniai. Pirmiausia, apskaičiuojamas CaO kiekis, kuris sudarė CaCO₃ reaguodamas su CO₂, tai yra kiek kalcio oksido sumažėjo anglies dioksido kietintame gaminyje. Vėliau, pagal CaO, CO₂ ir CaCO₃ molinių masių proporcijas išskaičiuojamas sunaudoto CO₂ kiekis. Gauti rezultatai pateikti 19 lentelėje:

19 lentelė. Apskaičiuotas 7 d. CO₂ + 21 d. ore kietintų cementinių gaminių sunaudoto CO₂ kiekis

Kietinimo laikas	Su CO ₂ reagavusio CaO kiekis, kg/m ³	Sunaudoto CO ₂ kiekis, kg/m ³	Procentinė CO ₂ dalis nuo rišiklio masės, %
7 d. CO ₂ + 21 d. ore	44,25	34,73	13,89

Titravimas buvo atliktas tik vienam gaminiui, kuris buvo kietintas mišriu metodu 7 d. CO₂ ir 21 d. ore, kad būtų galima įvertinti masės pokyčio metodo tikslumą. Titravimo metodu nustatyta, kad bandiniai sunaudavo 13,89 % CO₂ nuo cemento masės, o masės pokyčio metodu 13,32 %. Taigi

galima spręsti, kad rezultatai gauti masės pokyčio metodu yra pakankamai tikslūs, o skirtumas galėjo atsirasti, kadangi titravimui naudoti gaminiai buvo laikyti papildomai 21 d. ore.

3.3.2. Kalkiniai gaminiai

Masės pokyčio metodas

Kalkinių bandinių sunaudoto CO₂ kiekis apskaičiuojamas taip pat, kaip ir cementinių gamininių. Kadangi vyksta tokios pat reakcijos, kalcio hidroksidas reaguoja su anglies dioksidu ir sudaro kalcio karbonatą.

20 lentelė. Kalkinių gaminių sunaudoto CO₂ kiekis

Kietinimo laikas	CO ₂ kietintų bandinių tankis, kg/m ³	Ore kietintų bandinių tankis, kg/m ³	Sunaudoto CO ₂ kiekis*, kg/m ³	Procentinė CO ₂ dalis nuo rišiklio masės, %
5 val.	931,50	922,39	9,11	3,65
1 d.	936,96	921,55	15,40	6,16
3 d.	1047,22	1004,78	42,44	16,98
7 d.	1094,73	1016,30	78,43	31,37

* – aritmetiškai apskaičiuotas skirtumas tarp CO₂ kietintų bandinių tankio ir ore kietintų bandinių tankio.

Iš rezultatų lentelės, matome, kad per pirmas 5 val. kietinimo proceso, vienas kubas betono įsisavintu apie 9 kg anglies dioksido, tai yra apie 3,6 proc. rišiklio masės. Per pirmą parą apie 6 proc. rišiklio masės, per tris paras apie 17 proc., o per 7 paras apie 31 proc. Daugiausia CO₂ įsisavina bandiniai, kurie laikyti kameroje ilgiausiai ir reakcijos galėjo vykti ilgiau. Tačiau, kaip ir bandiniuose su cementiniu rišikliu, vykstančios reakcijos lėtėjo. Nors verta pabrėžti, kad ir po 7 d. kalkiniuose bandiniuose karbonizacija vyko gerokai efektyviau nei cementiniuose bandiniuose. Galbūt tai galima sieti su kalkiniuose bandiniuose esančiu daug didesniu kalcio karbonato kiekiu, su kuriuo reaguoja anglies dioksidas. Iš viso per 7 d. šie bandiniai įsisavino apie 78 kg/m³ CO₂, apie 31 proc. nuo rišiklio masės, tai 2,4 karto daugiau už cementinius gaminius.

Titavimo metodas

Šis metodas naudojamas tik įsitikinti ar masės pokyčio metodo rezultatai yra teisingi, todėl sunaudoto anglies dioksido kiekis skaičiuojamas tik ilgiausiai kietintiems gaminiams.

21 lentelė. Cementinių kalkinių titravimo rezultatai

Kietinimo metodas	Mėginio masė, g	Druskos rūgšties kiekis, ml	CaO procentinė dalis, %	Bandinio tankis, kg/m ³	CaO kiekis bandiniuose, kg/m ³
28 d. ore	1,004	4,4	12,29	990,90	121,77
7 d. CO ₂ + 21 d. ore	1,003	0,7	1,96	1136,76	22,25

Naudojama skaičiavimo metodika aprašyta 3.3.1. skyriuje. Gauti rezultatai pateikiami lentelėje:

22 lentelė. Apskaičiuotas 7 d. CO₂ + 21 d. ore kietintų kalkinių gaminių sunaudoto CO₂ kiekis

Kietinimo laikas	Su CO ₂ reagavusio CaO kiekis, kg/m ³	Sunaudoto CO ₂ kiekis, kg/m ³	Procentinė CO ₂ dalis nuo rišiklio masės, %
7 d. CO ₂ + 21 d. ore	99,52	78,11	31,24

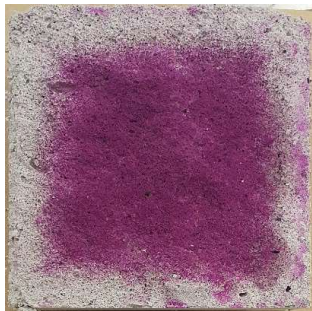





Šiuo metodu bandymas buvo atliktas tik mišriai 7 d. CO₂ ir 21 d. ore kietintiems gaminiais. Nustatyta, kad šie bandiniai utilizavo 78,11 kg/m³ anglies dioksido, tai yra 31,24 proc. nuo visos sudėtyje naudotos rišiklio masės. Masės pokyčio metodu 7 d. CO₂ kietinti gaminiai sunaudojo 31,37 proc. CO₂, tai yra beveik tiek pat, kaip ir titravimo metodu. Todėl galima teigti, kad ir kalkinių bandinių, sunaudoto anglies dioksido kiekis skaičiuojant masės pokyčio metodu yra tikslūs.

3.4. Karbonizacijos gylis

3.4.1. Cementiniai gaminiai

Naudojant fenolftaleino indikatorius vizualiai matoma, kokia bandinio dalis buvo paveikta anglies dioksido. Išmatuotas karbonizacijos gylis pateikiamas 23 lentelėje. Per pirmas 5 val. kietinimo buvo pasiektas 12,3 mm vidutinis karbonizacijos gylis, o pilna karbonizacija po 7 d. Ore laikytų bandinių paveiktas gylis po 7 d. buvo tik 5,6 mm, o po 28 d. 9,75 mm. Taigi CO₂ aplinkoje laikyti bandiniai, jau po 5 val. buvo labiau paveikti, nei bandiniai 28 d. laikyti ore. Be to, pagal 28 d. mišriai laikytų bandinių rezultatus matome, kad išėmus juos iš CO₂ kameros ir paliekant kietėti ore, karbonizacija vis dar vyksta efektyviai. CO₂ paveiktas plotas gerokai sumažėja, lyginant su ankstyvaisiais bandiniais. Tikslesnį karbonizacijos laipsnio šiuo metodu nustatyti nepavyks, nes paveiktas bandinio gylis netolygus karbonizacijos efektyvumui. Tai galima matyti iš 5 val. ir 1 d. CO₂ aplinkoje kietintų bandinių nuotraukų, abiejų bandinių karbonizacijos gylis panašus, tačiau pagal fenolftaleino indikatorius spalvą galima spręsti, kad 1 d. laikytas bandinys sunaudojo daugiau CO₂.

23 lentelė. Cementinių gaminių vidutinis karbonizacijos gylis

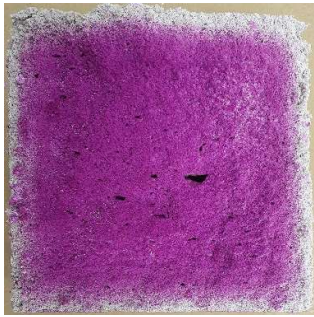


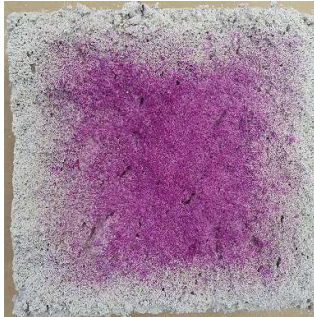


Laikas ir metodas	Kietinta CO ₂ dujose 5 val.	Kietinta Ore 5 val.	Kietinta CO ₂ 5 val. + 27 d. ore
			
Karbonizacijos gylis, mm	12,3	0	27,5
Laikas ir metodas	Kietinta CO ₂ dujose 1 d.	Kietinta Ore 1 d.	Kietinta CO ₂ 1 d. + 27 d. ore
			








Karbonizacijos gylis, mm	15,5	0	31,4
Laikas ir metodas	Kietinta CO ₂ dujose 3 d.	Kietinta Ore 3 d.	Kietinta CO ₂ 3 d. + 25 d. ore
			
Karbonizacijos gylis, mm	20,4	1,5	Pilna karbonizacija
Laikas ir metodas	Kietinta CO ₂ dujose 7 d.	Kietinta Ore 7 d.	Kietinta CO ₂ 7 d. + 21 d. ore
			
Karbonizacijos gylis, mm	Pilna karbonizacija	5,6	Pilna karbonizacija
Laikas ir metodas		Kietinta Ore 28 d.	
	–		–
Karbonizacijos gylis, mm	–	9,75	–

3.4.2. Kalkiniai gaminiai

Kalkinių gaminių, kitaip nei cementinių, karbonizacija vyksta kur kas lėčiau. Gaminių 5 val. laikytų CO₂ aplinkoje paveiktas gylis buvo 6,3 mm, juos palikus dar 27d. kietėti ore, gylis padidėjo iki 12,9 mm, tai yra dvigubai mažiau nei cementinių gaminių. Pilna karbonizacija nebuvo pasiekta, ilgiausiai – 7 d. kietintų gaminių, paveiktos dalies vidutinis gylis 21,5 mm. Anglies dioksido įtaką ore laikytiems gaminiams pasimatė tik po 3 d., karbonizacijos gylis 1,5 mm, po 28 d. kietinimo jis pasiekė 2,9 mm, 3 kartus mažiau nei cementinių gaminių. Tam didelę įtaką turi gaminių cheminė sudėtis, kalkiniai gaminiai turi didelį kiekį kalcio hidroksido, kuris iškart gali reaguoti su CO₂, nereikia laukti, kol prasidės hidratacijos procesai.

24 lentelė. Kalkinių gaminių vidutinis karbonizacijos gylis

Laikas ir metodas	Kietinta CO ₂ dujose 5 val.	Kietinta Ore 5 val.	Kietinta CO ₂ 5 val. + 27 d. ore
			
Karbonizacijos gylis, mm	6,3	0	12,9
Laikas ir metodas	Kietinta CO ₂ dujose 1 d.	Kietinta Ore 1 d.	Kietinta CO ₂ 1 d. + 27 d. ore
			
Karbonizacijos gylis, mm	11,2	0	17,7

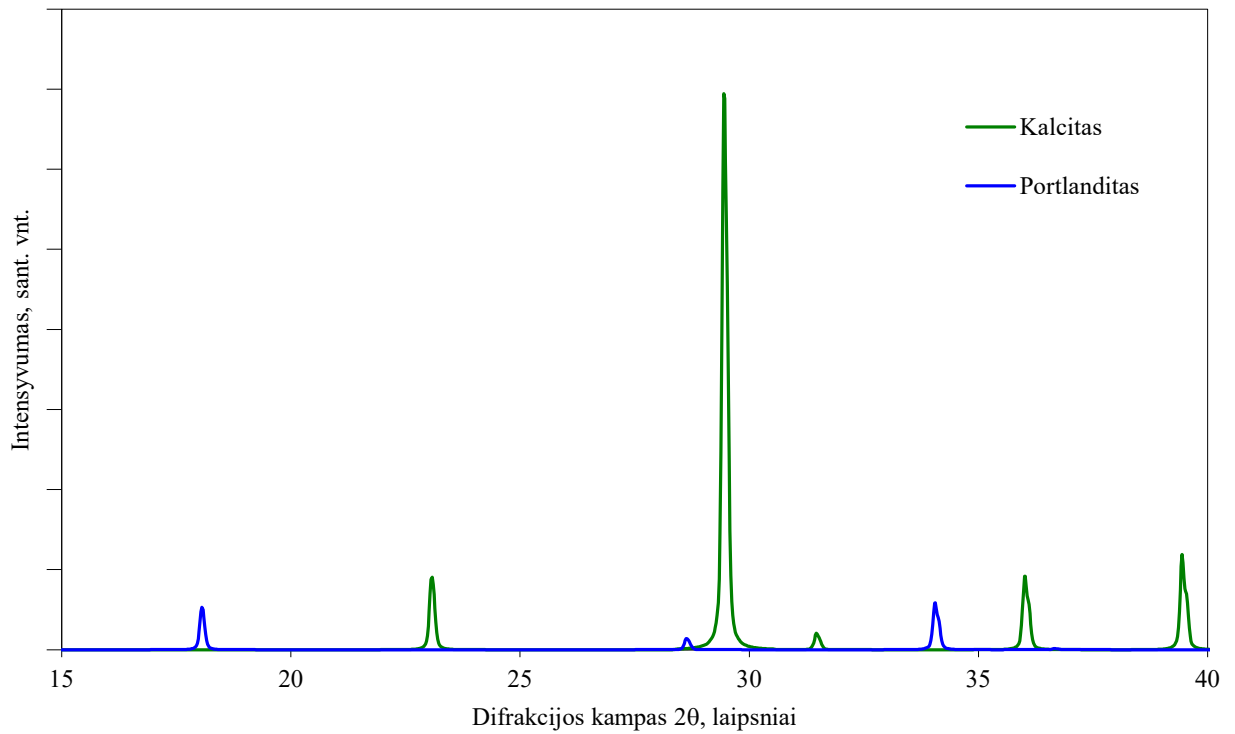
Laikas ir metodas	Kietinta CO ₂ dujose 3 d.	Kietinta Ore 3 d.	Kietinta CO ₂ 3 d. + 25 d. ore
			
Karbonizacijos gylis, mm	13,8	1,5	18,4
Laikas ir metodas	Kietinta CO ₂ dujose 7 d.	Kietinta Ore 7 d.	Kietinta CO ₂ 7 d. + 21 d. ore
			
Karbonizacijos gylis, mm	21,5	2,3	21,9
Laikas ir metodas		Kietinta Ore 28 d.	
	–		–
Karbonizacijos gylis, mm	–	2,9	–

3.5. XRD analizė

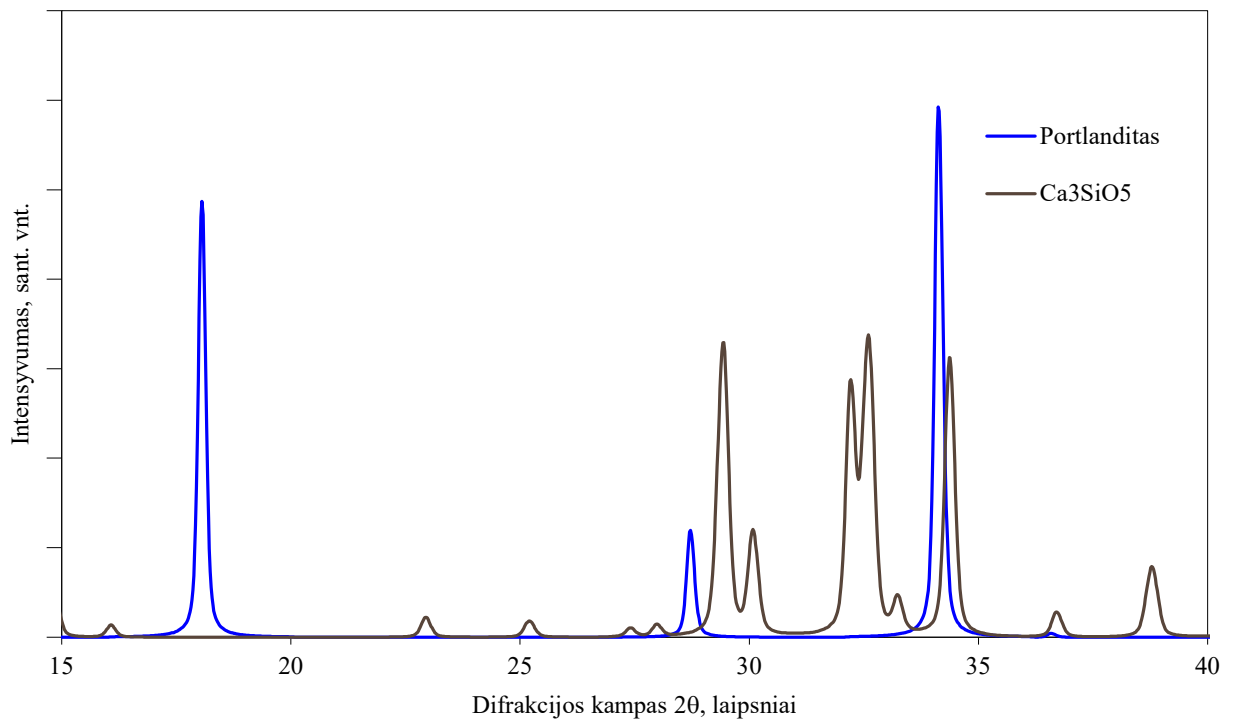
Ankstesniame skyriuje naudojant fenolftaleino indikatorius, vizualiai galima lengvai įvertinti, ar betono terpė yra rūgštinė, ar šarminė. Tačiau jis tiksliai neparodo ar terpė tapo rūgštine dėl karbonizacijos, ar dėl kitų kalcio hidroksido pašalinimo priežasčių. Įvertinti ar tikrai kalcio hidroksidas reaguoja su CO₂ galima naudojant XRD analizę. Palyginimui XRD analizė atlikta cementiniams ir kalkiniams gaminiams kietintiems CO₂ 7 d. + papildomai 21 d. ore, bei bandiniams laikytiems 28 d. tik ore. Mėginiai analizei atlikti, paimti iš perskeltų bandinių centro. Bandymo metu

buvo fokusuojamasi į kalcito ir portlandito junginių kieki, pagal juos galima nustatyti ar tikrai portlanditas CO₂ kietintuose gaminiuose virsta kalcitu.

3.5.1. Cementiniai gaminiai



20 pav. 7 d. CO₂ + 21 d. ore kietintų cementinių bandinių rentgenograma

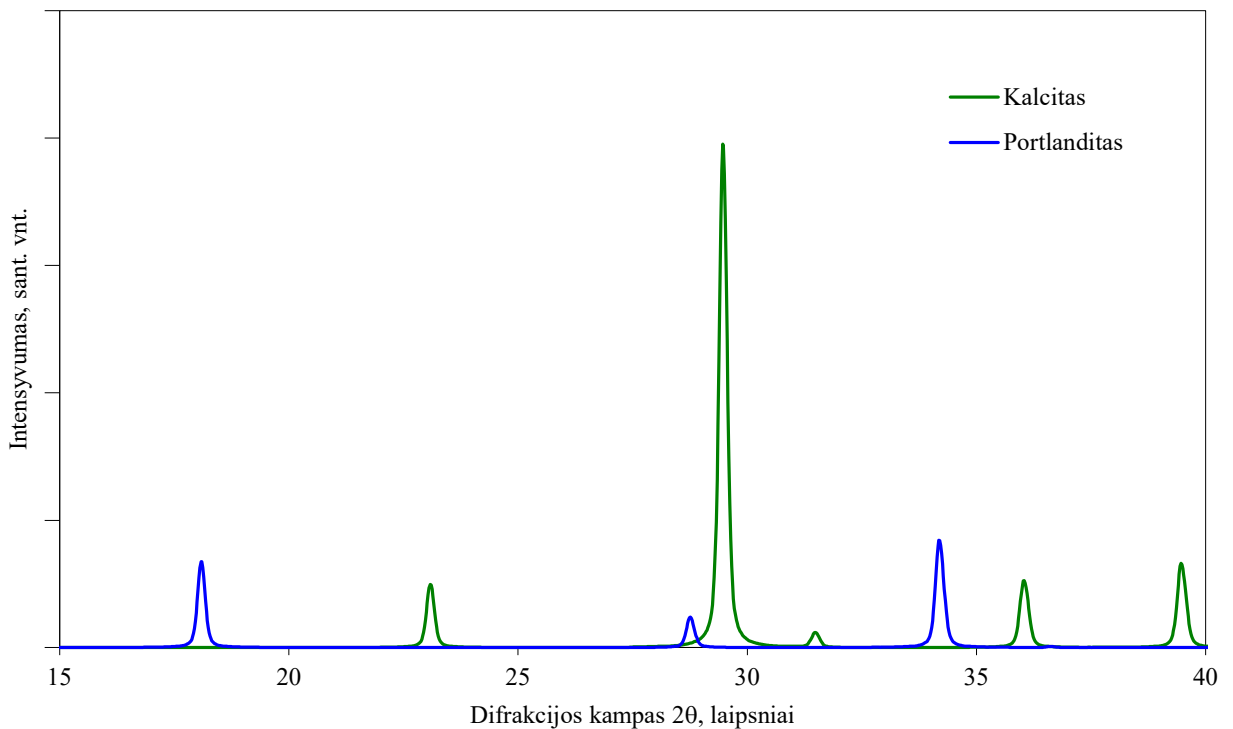


21 pav. 28 d. ore kietintų cementinių bandinių rentgenograma

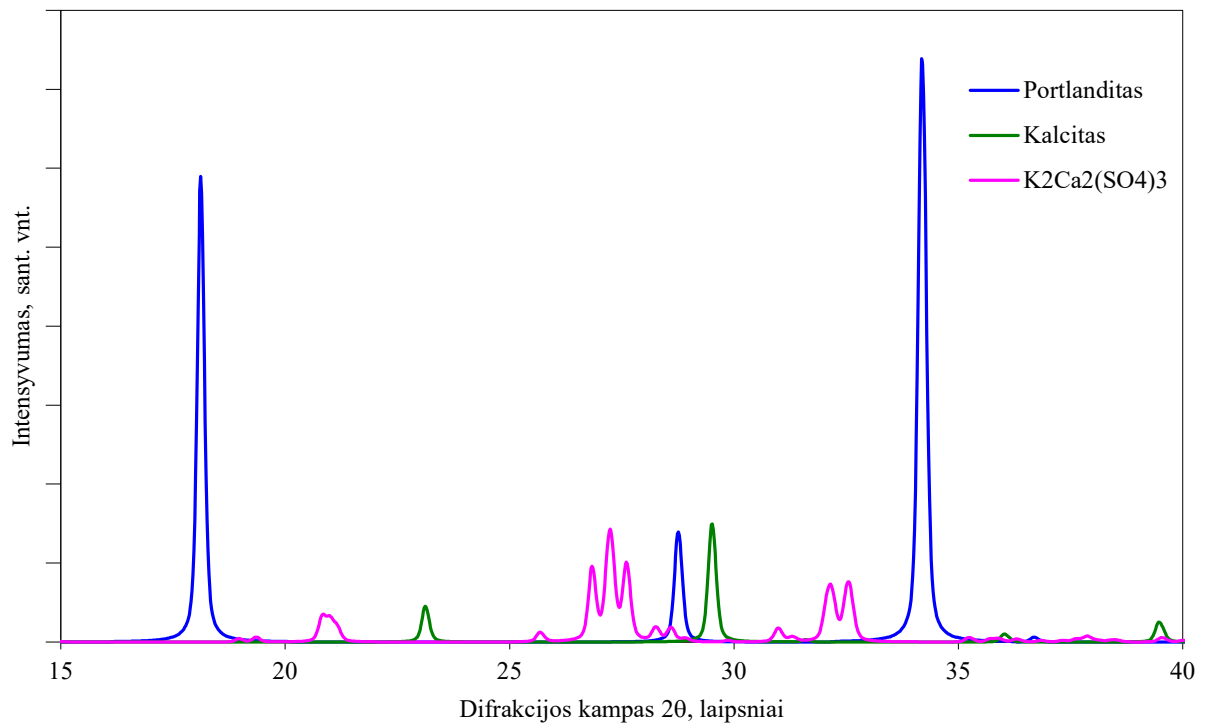
Pagal pateiktas rentgeno spindulių difraktogramas matome, kad 28 d. ore laikytuose bandiniuose buvo aptiktas tik portlanditas, didžiausi šuoliai nustatyti ties $34,14^\circ 2\theta$. Kalcito šiuose bandiniuose aptikta nebuvo. Anglies dioksido laikytuose gaminiuose portlandito kiekis ženkliai sumažėja, jo daugiausia aptikta ties $34,08^\circ 2\theta$, tačiau kiekis kur kas mažesnis, nei ore kietintų bandinių. Sumažėjusį kiekį nulemia, reaguojant su CO_2 susidaręs kalcitas, didžiausias šuolis matomas prie $29,46^\circ 2\theta$. Atlikta XRD analizė patvirtina, kad cementiniuose gaminiuose karbonizacija įvyko sėkmingai ir didžioji dalis kalcio hidroksido reaguojant su anglies dioksidu virto kalcio karbonatu.

3.5.2. Kalkiniai gaminiai

28 d. ore laikytuose gaminiuose didžiausias portlandito kiekis nustatytas ties $34,18^\circ 2\theta$, tačiau kitaip nei cementiniuose gaminiuose, taip pat buvo aptikta ir nedidelė dalis jau susiformavusio kalcito ties $29,54^\circ 2\theta$. Anglies dioksido kietintuose bandiniuose portlandito kiekis daug mažesnis (didžiausias šuolis ties $34,22^\circ 2\theta$). Tačiau nustatytas daug didesnis kalcito kiekis ties $29,46^\circ 2\theta$. Pagal tai galima spręsti, kad karbonizacija kalkiniuose gaminiuose taip pat vyksta sėkmingai. Kalcio hidroksido kiekis CO_2 kietintuose bandiniuose mažėja ir jis virsta kalcio karbonatu.



22 pav. 7 d. CO_2 + 21 d. ore kietintų kalkinių bandinių rentgenograma



23 pav. 28 d. ore kietintų kalkinių bandinių rentgenograma

Išvados

1. Šiuose tyrimuose buvo pagaminti nuo 500 iki 950 kg/m³ tankio lengvojo putų betono bandiniai su cementiniu ir kalkiniu rišikliu. Juos karbonizuojant CO₂ dujų aplinkoje skirtingą laiko tarpą (5 val., 1 d., 3 d., 7 d.).
2. Atlikus bandymus nustatyta, kad lengvojo betono su cementiniu rišikliu kietinimas CO₂ aplinkoje padidina ankstyvąjį betono stiprį iki 38,8 proc., o gniuždymo stiprį po 28 d. iki 30,3 proc., lyginant su ore kietintais kontroliniais gaminiiais. Įvertinus kietinimo trukmę stiprio pokyčiui, galima teigti, kad efektyviausias kietinimo laikas CO₂ aplinkoje yra 1 diena, jeigu siekiama didesnio galutinio gaminio gniuždymo stiprio.
3. Atlikus bandinių su kalkiniu rišikliu gniuždymo stiprio nustatymą, paaiškėjo, jog karbonizuotų gaminių ankstyvasis gniuždymo stipris yra 3,8 karto didesnis už ore kietintų, o įprastas stipris apie 6,3 karto (po 28 parų). Efektyviausia kietinimo trukmė CO₂ aplinkoje yra 3 dienos, vėliau CO₂ dujų įtaka stipriui ženkliai mažėja.
4. Atlikus cementinių bandinių utilizuoto CO₂ kiekio nustatymą, gauta, kad per pirmas 5 val. bandiniai laikyti CO₂ kameroje utilizavo 15,6 kg/m³ (6,3 % rišiklio masės) anglies dioksido tai yra, beveik pusę utilizuoto CO₂ per visą bandymo trukmę. Per visą bandymo laikotarpį (7 d.) bandiniai sunaudavo 33,3 kg/m³ (13,3 % rišiklio masės) CO₂. Optimalus kietinimo laikas, siekiant utilizuoti anglies dioksidą, yra 3 dienos, per jas bandiniai sunaudavo 26,3 kg/m³ CO₂.
5. Kalkiniai bandiniai sunaudoja gerokai daugiau anglies dioksido už cementinius. Per pirmas 5 val. bandiniai su kalkiniu rišikliu utilizavo 9,1 kg/m³ (3,7 % rišiklio masės), tačiau per 7 dienas 78,4 kg/m³ (31,4 % rišiklio masės) tai yra daugiau nei 2 kartus daugiau už cementinius gaminius. Bandinių kietintų skirtingą laiką rezultatai rodo, kad visą bandymo laikotarpį karbonizacija vyksta efektyviai.
6. Atlikus vizualinę karbonizacijos gylio nustatymą naudojant fenolftaleino indikatorių nustatyta, jog cementiniai gaminiai pilną karbonizaciją pasiekia po 7 d. kietinimo CO₂ aplinkoje. Per pirmas 5 val. pasiekia vidutinį 12,3 mm gylį, tai yra daugiau už ore 28 d. laikyto kontrolinio bandinio (9,8 mm). Kalkiniuose bandiniuose karbonizacija vyksta lėčiau, per pirmas 5 val. vidutinis gylis buvo tik 6,3 mm, o pilnos karbonizacijos per visą bandymo laikotarpį (7 d.) pasiekti nepavyko. Tačiau pastebėta, kad abiejų rišiklių bandiniams, nors ir trumpa karbonizacijos trukmė, suteikia pagrindą tolesnei karbonizacijai vykti ir nesustoja tik išėmus bandinių iš kietinimo kameros.
7. Atlikus XRD analizę, nustatyta, kad cementiniuose gaminiuose kalcitas susidaro tik juos kietinant CO₂ aplinkoje, ore laikytuose bandiniuose buvo aptiktas tik portlanditas. Kietinant bandinius CO₂ dujose, šis portlanditas reaguoja su CO₂ ir virsta kalcitu. Kalkiniuose bandiniuose, kitaip nei cementiniuose, nedidelė dalis kalcito buvo aptikta ir ore kietintuose gaminiuose. Tačiau CO₂ kietintuose bandiniuose jo buvo daug daugiau, kadangi beveik visas portlanditas buvo reagavęs su CO₂.
8. Kiekybiniam karbonizacijos efektyvumo vertinimui labiausiai tinkami masės pokyčių ir titravimo druskos rūgštimi metodai. Kokybiniam vertinimui pakanka fenolftaleino indikatoriaus panaudojimo.

Literatūros sąrašas

1. FRIEDLINGSTEIN, P., et al. Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst.Sci.Data* [interaktyvus], 2020, vol. 12, no. 4. [žiūrėta 2021-10-26]. Prieiga per: <https://essd.copernicus.org/articles/12/3269/2020/>
2. CEMBUREAU: 2050 Carbon Neutrality Roadmap. 2020 [žiūrėta 2021-12-17]. Prieiga per: https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf
3. 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* [interaktyvus], 2013, vol. 43. [žiūrėta 2021-10-26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>.
4. HUANG, H., et al. Life-Cycle Assessment of Emerging CO₂ Mineral Carbonation-Cured Concrete Blocks: Comparative Analysis of CO₂ Reduction Potential and Optimization of Environmental Impacts. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus], 2019, vol. 241. [žiūrėta 2021-10-26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118359>.
5. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS [LST EN 206-1] taikymo taisyklės ir papildomieji nacionaliniai reikalavimai. . [s.l.]: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2012.
6. RAMAMURTHY, K., KUNHANANDAN NAMBIAR, E.K. and INDU SIVA RANJANI, G. A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus] 2009, vol. 31, no. 6. [žiūrėta 2021-10-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>.
7. NAUJOKAITIS, A.P. *Statybinės Medžiagos. Betonai: Mokomoji Knyga*. Vilnius: Technika, 2007 ISBN 9789955282099.
8. INGHAM, J.P. *Geomaterials Under the Microscope* J.P. INGHAM ed., Boston: Academic Press, 2013 [interaktyvus] 8 - Mortar, Plaster, and Render, pp. [žiūrėta 2021-10-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407230-5.50016-9>.
9. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS [LST EN 459-1:2010]. *Statybinės Kalkės: Building Lime*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
10. KAMINSKAS, R., BALTAKYS, K.ė, EISINAS, A. and BARAUSKAS, I. *Cemento Chemija Ir Technologija*. Kaunas: Technologija, 2021 ISBN 9786090217368. DOI 10.5755/e01.9786090217375.
11. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS [LST EN 197-1:2011]. *Cementas. 1 Dalis. Įprastinių Cementų Sudėtis, Techniniai Reikalavimai Ir Atitikties Kriterijai*. 2013-01-10. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2013.
12. AMRAN, Y.H.M., FARZADNIA, N. and ABANG ALI, A.A. Properties and Applications of Foamed Concrete; a Review. *Construction and Building Materials* [interaktyvus], 2015, vol. 101. [žiūrėta 2021-03-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>.
13. KEARSLEY, E.P. and WAINWRIGHT, P.J. The Effect of High Fly Ash Content on the Compressive Strength of Foamed Concrete. *Cement and Concrete Research* [interaktyvus], 2001, vol. 31, no. 1. [žiūrėta 2021-03-10]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00430-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00430-0).
14. NANDI, S., CHATTERJEE, A., SAMANTA, P. and TANUSHREE, H. Cellular Concrete & its Facets of Application in Civil Engineering. *International Journal of Engineering Research* [interaktyvus], 2016, vol. 5. [žiūrėta 2021-05-10]. Prieiga per: DOI 10.17950/ijer/v5i1/009.

15. PANESAR, D.K. Cellular Concrete Properties and the Effect of Synthetic and Protein Foaming Agents. *Construction and Building Materials* [interaktyvus], 2013, vol. 44. [žiūrėta 2021-05-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.024>.
16. VARGHESE, S., et al. A Study on Properties of Foamed Concrete with Natural and Synthetic Foaming Agent. [interaktyvus], 2009. [žiūrėta 2021-05-11]. Prieiga per: <https://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I3534.pdf>
17. FALLIANO, D., DE DOMENICO, D., RICCIARDI, G. and GUGLIANDOLO, E. Experimental Investigation on the Compressive Strength of Foamed Concrete: Effect of Curing Conditions, Cement Type, Foaming Agent and Dry Density. *Construction and Building Materials*, 2018 [interaktyvus], vol. 165. [žiūrėta 2021-05-11]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241>.
18. CHICA, L. and ALZATE, A. Cellular Concrete Review: New Trends for Application in Construction. *Construction and Building Materials*, 2019 [interaktyvus], vol. 200. [žiūrėta 2021-05-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.136>.
19. ALDRIDGE, D. Use of Foamed Concrete in Construction Thomas Telford Publishing, 2005 [interaktyvus] Introduction to Foamed Concrete: What, Why, how?. [žiūrėta 2021-05-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1680/uofcic.34068.0001>
20. BENINGFIELD, N., GAIMSTER, R. and GRIFFIN, P. Use of Foamed Concrete in Construction Thomas Telford Publishing, 2005 [interaktyvus] Investigation into the Air Void Characteristics of Foamed Concrete. [žiūrėta 2021-05-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1680/uofcic.34068.0007>
21. LIU, B., et al. New Perspectives on Utilization of CO₂ Sequestration Technologies in Cement-Based Materials. *Construction and Building Materials*, 2021 [interaktyvus], vol. 272. [žiūrėta 2021-03-08] Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121660>.
22. ZHANG, D., GHOULEH, Z. and SHAO, Y. Review on Carbonation Curing of Cement-Based Materials. *Journal of CO₂ Utilization*, 2017 [interaktyvus], vol. 21. [žiūrėta 2021-03-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.07.003>.
23. CHANG, J., FANG, Y. and SHANG, X. The Role of β -C₂S and γ -C₂S in Carbon Capture and Strength Development. *Materials and Structures*, 2016 [interaktyvus], vol. 49, no. 10. [žiūrėta 2021-03-10] Prieiga per: <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0797-5>
24. 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 [interaktyvus], vol. 44. [žiūrėta 2021-03-11]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101428>.
25. SHI, C., HE, F. and WU, Y. Effect of Pre-Conditioning on CO₂ Curing of Lightweight Concrete Blocks Mixtures. *Construction and Building Materials*, 2012 [interaktyvus], vol. 26, no. 1. [žiūrėta 2021-10-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.020>.
26. MORSHED, A.Z. and SHAO, Y. Influence of Moisture Content on CO₂ Uptake in Lightweight Concrete Subject to Early Carbonation. *Journal of CO₂ Utilization*, 2013 [interaktyvus], vol. 2, no. 2. [žiūrėta 2021-03-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/21650373.2013.797373>
27. 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 [interaktyvus], vol. 105. [žiūrėta 2021-03-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446>.

28. WANG, L., et al. Accelerated Carbonation of Reactive MgO and Portland Cement Blends Under Flowing CO₂ Gas. *Cement and Concrete Composites*, 2020 [interaktyvus], vol. 106. [žiūrėta 2021-03-14] Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103489>.
29. KASHEF-HAGHIGHI, S. and GHOSHAL, S. CO₂ Sequestration in Concrete through Accelerated Carbonation Curing in a Flow-through Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010 [interaktyvus], vol. 49, no. 3. [žiūrėta 2021-03-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/ie900703d>
30. PAN, X., SHI, C., HU, X. and OU, Z. Effects of CO₂ Surface Treatment on Strength and Permeability of One-Day-Aged Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, 2017 [interaktyvus], vol. 154. [žiūrėta 2021-03-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.216>.
31. MENG, Y., LING, T., MO, K.H. and TIAN, W. Enhancement of High Temperature Performance of Cement Blocks Via CO₂ Curing. *Science of the Total Environment*, 2019 [interaktyvus], vol. 671. [žiūrėta 2021-03-17]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.411>.
32. ZHANG, D. and SHAO, Y. Effect of Early Carbonation Curing on Chloride Penetration and Weathering Carbonation in Concrete. *Construction and Building Materials*, 2016 [interaktyvus], vol. 123. [žiūrėta 2021-03-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.041>.
33. SHARMA, D. and GOYAL, S. Effect of Accelerated Carbonation Curing on Near Surface Properties of Concrete. *Null*, 2020 [interaktyvus] . [žiūrėta 2021-05-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1707714>
34. ZHANG, D. and SHAO, Y. Surface Scaling of CO₂-Cured Concrete Exposed to Freeze-Thaw Cycles. *Journal of CO₂ Utilization*, 2018 [interaktyvus], vol. 27. [žiūrėta 2021-05-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.07.012>.
35. MORSHED, A.Z. and SHAO, Y. Influence of Moisture Content on CO₂ Uptake in Lightweight Concrete Subject to Early Carbonation. *Null*, 2013 [interaktyvus], vol. 2, no. 2. [žiūrėta 2021-05-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/21650373.2013.797373>
36. WANG, D., NOGUCHI, T. and NOZAKI, T. Increasing Efficiency of Carbon Dioxide Sequestration through High Temperature Carbonation of Cement-Based Materials. *Journal of Cleaner Production*, 2019 [interaktyvus], vol. 238. [žiūrėta 2021-10-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117980>.
37. SHI, C., LIU, M., HE, P. and OU, Z. Factors Affecting Kinetics of CO₂ Curing of Concrete. *Null*, 2012 [interaktyvus], vol. 1, no. 1-2. [žiūrėta 2021-10-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/21650373.2012.727321>.
38. AHMAD, S., et al. Effects of Carbonation Pressure and Duration on Strength Evolution of Concrete Subjected to Accelerated Carbonation Curing. *Construction and Building Materials*, 2017 [interaktyvus], vol. 136. [žiūrėta 2021-03-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.069>.
39. 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 [interaktyvus], vol. 85. [žiūrėta 2021-10-23]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.005>.
40. 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 [interaktyvus], vol. 71. [žiūrėta 2021-10-23]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.002>.
41. 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 [interaktyvus], vol. 111. [žiūrėta 2021-10-25]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103616>.
42. JANG, J.G. and LEE, H.K. Microstructural Densification and CO₂ Uptake Promoted by the Carbonation Curing of Belite-Rich Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 2016 [interaktyvus], vol. 82. [žiūrėta 2021-10-25]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.001>.
43. IVANAUSKAS, Ernestas, Algirdas AUGONIS, Ramūnas GEČYS ir Vitoldas VAITKEVIČIUS. *Statybinių Medžiagų Laboratoriniai Darbai: Mokomoji Knyga*. Kaunas [i.e. Vilnius]: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2011 ISBN 9789955207078.