



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Granuliuotų dirbtinių užpildų gamyba žaliosios technologijos būdu naudojant įvairius rišiklius ir atliekas

Baigiamasis magistro projektas

Lukas Eibutis

Projekto autorius

Doc. Algirdas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Granuliuotų dirbtinių užpildų gamyba žaliosios technologijos būdu naudojant įvairius rišiklius ir atliekas

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Lukas Eibutis

Projekto

Doc. Algirdas Augonis

Vadovas

Lekt. Evaldas Šerelis

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lukas Eibutis

Granuliuotų dirbtinių užpildų gamyba žaliosios technologijos būdu naudojant įvairius rišiklius ir atliekas

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.

Lukas Eibutis

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.):

Granuliuotų dirbtinių užpildų gamyba žaliosios technologijos būdu naudojant įvairius rišiklius ir atliekas

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.:

V25-09-16

(lietuvių k.): GRANULIUOTŲ DIRBTINIŲ UŽPILDŲ GAMYBA ŽALIOSIOS TECHNOLOGIJOS BŪDU NAUDOJANT ĮVAIRIUS RIŠIKLIUS IR ATLIEKAS

(anglų k.):

PRODUCTION OF GRANULAR ARTIFICIAL AGGREGATES BY GREEN TECHNOLOGY USING VARIOUS BINDERS AND WASTE

Pradiniai duomenys darbui:

--

Baigiamojo projekto dalys:

Atlikti

Įvadas

Literatūros apžvalga

Metodologija

 Eksperimentiniai tyrimai

 Analitiniai tyrimai

 Skaitiniai tyrimai

 Ekonominė dalis

Išvados

Kita informacija (pagal poreikį):

--

Vadovas:

Doc. Algirdas Augonis

(indėlis 100 %)

*pareigos, vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu*

Konsultantas:

(indėlis _____ %)

pareigos, vardas, pavardė

Konsultantas:

(indėlis _____ %)

pareigos, vardas, pavardė

Studentas:

Lukas Eibutis

*vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu*

Eibutis, Lukas. Granuliuotų dirbtinių užpildų gamyba žaliosios technologijos būdu naudojant įvairius rišiklius ir atliekas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. Algirdas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: dirbtiniai užpildai, granuliavimas, rišikliai, žaliąji technologija, karbonizavimas.

Kaunas, 2023. 57 p.

Santrauka

Baigiamajame projekte yra naudojami perdirbti pelenai gaminant dirbtinius užpildus. Šie užpildai yra gaminami granuliavimo būdu, naudojant skirtingas sudėtis ir karbonizavimo metodus. Gauti dirbtiniai užpildai ir jų savybės yra lyginami su keramzito užpildais.

Magistro baigiamasis projektas susideda iš trijų dalių: literatūros analizės, naudojamų metodų ir medžiagų apžvalgos, bei rezultatų apžvalgos. Literatūros analizėje yra apžvelgiama kokios medžiagos yra tinkamos granuliavimui ir kokie veiksniai įtakoja granuliavimosi procesą. Taip pat yra išnagrinėjamas karbonizacijos procesas, kokie metodai yra taikomi karbonizuoti betoniniams bandiniams ir kokios medžiagos yra tinkamos karbonizacijai. Metodų ir medžiagų apžvalgoje yra aprašomi metodai kurie bus naudojami pelenų granuliavimo procese, kaip bus tiriamos bandinių savybės ir kokios medžiagos, bei sudėtys yra naudojamos tyrime. Paskutinėje, eksperimentinių rezultatų dalyje, analizuojama kaip keitėsi dirbtinių užpildų, bei jų betoninių gaminių, fizikinės ir mechaninės savybės naudojant skirtingus rišiklius, bei kietinimo metodus.

Baigiamajame darbe naudojamos 22 lentelės, 39 paveikslukai, 49 literatūros šaltiniai.

Eibutis, Lukas. Production of Granular Artificial Aggregates by Green Technology using Various Binders and Waste. Master's final degree project / supervisor Doc. 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: artificial aggregates, granulation, binders, green technology, carbonization.

Kaunas, 2023. 57 p.

Summary

In the final project recycled ash is used in the production of artificial aggregates. These aggregates are produced by granulation using different compositions and carbonization methods. The obtained artificial aggregates and their properties are compared with expanded clay aggregates.

The master's final project consists of three parts: literature analysis, review of methods and materials used, and review of results. In the literature analysis, suitable materials for granulation and factors which influence the granulation process are reviewed. Also, different methods and suitable materials are examined which can be used in the carbonization process. The review of methods and materials describes the methods that will be used in the fly-ash granulation process, how the properties of the samples will be examined and what material compositions are used in the study. The last part, the experimental results, analyzes how the physical and mechanical properties of artificial aggregates and their concrete products changed using different binders and curing methods.

In the master's final degree project 22 tables, 39 figures, 49 literatures sources are used.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas.....	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros analizė ir apžvalga.....	13
1.1. CO₂ kietinimo technologija	13
1.1.1. Autoklavinis metodas	13
1.1.2. Beautoklavinis metodas.....	14
1.1.3. Dujų srauto metodas	15
1.1.4. Vandens ir CO ₂ kietinimo metodas	15
1.1.5. Bandinių hidratavimas.....	15
1.2. CO₂ kietinimo technologijai tinkamos medžiagos	16
1.3. Dirbtinių užpildų gamyba kietinant CO₂ aplinkoje bei poveikis betonui	17
1.3.1. Anglies dioksido dujų koncentracijos įtaka karbonizacijos lygiui	17
1.3.2. Karbonizacijos lygio nustatymas.....	18
1.3.3. Karbonizavimosi laiko įtaka.....	19
1.3.4. Užpildo dalelių dydžio įtaka karbonizacijai	19
1.3.5. Temperatūros įtaka karbonizacijai	20
1.3.6. Perdirbamų medžiagų savybių įtaka.....	21
1.3.7. Karbonizacijos poveikis betono pH lygiui	21
1.3.8. Karbonizacijos poveiki betono poringumui	21
1.4. CO₂ utilizacija	21
1.5. Dirbtinių užpildų gamybos technologijos.....	23
1.6. Dirbtinių užpildų panaudojimas	24
2. Naudojama metodika ir medžiagos	25
2.1. Naudojamų standartų sąrašas.....	25
2.2. Tiriamojoje dalyje naudotos medžiagos	25
2.2.1. Cementas	25
2.2.2. Kalkės.....	26
2.2.3. Smėlis	26
2.2.4. Pelenai	27
2.3. Metodai naudoti tiriamojoje dalyje	27
2.3.1. Granuliavimas.....	27
2.3.2. Drėgno nustatymas	29
2.3.3. Piltinio ir tikrojo tankio nustatymas	29
2.3.4. Vandens įmirkio nustatymas	30
2.3.5. Karbonizacija.....	30
2.3.6. Titravimas.....	32
2.3.7. Skalumo bandymas.....	32
2.3.8. Betoninių gaminių gamyba.....	33
3. Rezultatai.....	35
3.1. Granuliavimo procesas	35
3.2. Dirbtinių užpildų piltinis tankis	35
3.2.1. Užpildai su nemaltais pelenais	35

3.2.2. Užpildai su maltais pelenais	36
3.2.3. Karbonizuoti užpildai su maltais pelenais	37
3.3. Užpildų drėgnumas	38
3.4. Dirbtinių užpildų tankis.....	39
3.4.1. Nekarbonizuotų užpildų tankiai	39
3.4.2. Karbonizuotų užpildų tankiai	40
3.5. Dirbtinių užpildų vandens įgeriamumas	41
3.6. Dirbtinių užpildų gniuždymo stipris.....	42
3.6.1. Nekarbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris.....	42
3.6.2. Karbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris.....	43
3.7. Betoninių gaminių gamyba naudojant dirbtinius užpildus	44
3.8. Karbonizacija užpilduose	46
3.8.1. Karbonizacijos gylis	46
3.8.2. Anglies dioksido utilizacija dirbtiniuose užpilduose.....	47
3.9. Vandeniui laidūs betoniniai gaminiai	48
3.10. Pelenų XRD analizė	48
3.11. Užpildų ekonominis palyginimas	49
Išvados	51
Literatūros sąrašas	52
Priedai.....	57
1 priedas. Dalyvavimo „SMART BUILT ENVIRONMENT“ sertifikatas	57

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Tyrime naudoto cemento cheminė ir mineralinė sudėtis nustatyta su rentgeno spinduliavimu (w/%) [20]	18
2 lentelė. Tyrimo bandinių duomenys [25].	20
3 lentelė. Anglies dioksido išskiriamas kiekis atitinkamai betono klasei [33].	22
4 lentelė. ROCKET CEMENT M-600 stipruminės savybės po atitinkamo kietėjimo periodo [37].	26
5 lentelė. OTTERBEIN gamtinės hidraulinės kalkės NHL 3,5 stipruminės savybės po atitinkamo kietėjimo periodo [39].	26
6 lentelė. Granulių gamybai naudojama mišinio sudėtis 1 m ³	28
7 lentelė. Cilindrų gamybai naudojama masė mišinyje 1 m ³ medžiagos išgauti	33
8 lentelė. Nemaltų pelenų užpildų piltinis tankis	35
9 lentelė. Maltų pelenų užpildų piltinis tankis	36
10 lentelė. Maltų karbonizuotų pelenų užpildų piltinis tankis	37
11 lentelė. Nekarbonizuotų užpildų tankis	39
12 lentelė. Karbonizuotų užpildų tankis	40
13 lentelė. Užpildų vandens įgeriamumas	41
14 lentelė. Nekarbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris	42
15 lentelė. Karbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris	43
16 lentelė. Betoninių gaminių tankis	44
17 lentelė. Betoninių cilindrinų bandinių gniuždymo stipris	44
18 lentelė. Masės pokytis karbonizacijos metu	47
19 lentelė. Titravimo metodu nustatomas anglies dioksido utilizavimo kiekis	47
20 lentelė. vandens laidumas korėtų betoninių gaminių.	48
21 lentelė. Pelenų cheminių elementų sudėtis	49
22 lentelė. Pelenų metalų oksidų sudėtis	49

Paveikslų sąrašas

1 pav. Autoklavinio metodo aparato veikimo schema [13]	14
2 Pav. Beautoklavinio metodo gniuždymo stiprio priklausomybė nuo temperatūros pokyčių [15].	14
3 pav. Dujų srauto aparato veikimo schema [16].....	15
4 pav. Vandens ir CO ₂ mišinio karbonizacijos metodas [17].	15
5 pav. Pelenų cheminė sudėtis pagal kilmę iš skirtingų šalių [21].....	16
6 pav. Karbonizacijos paveikti bandiniai paryškinant ją fenolftaleinu, kairėje po 12 valandų kietėjimo, dešinėje po 27 dienų [27].	18
7 pav. Karbonizacijos modelis nurodantis skirtumą tarp dviejų patikrinimo metodų [26].....	19
8 pav. Karbonizacijos procentas laiko atžvilgiu [28].....	19
9 pav. Dalelių dydžio efektas anglies dioksido sugerčiai [25].....	20
10 pav. Sugerto anglies dioksido kiekis priklausomai nuo slėgio prie 25°C (▲) ir 45 °C (■) temperatūros [32].....	22
11 pav. Smulkių dalelių granuliavimosi procesas [34]	23
12 pav. Medžiagų pasiskirstymas granuliavimo diske priklausomai nuo sukimosi greičio. a – žemas greitis, b – vidutinis greitis, c – didelis greitis [34].	23
13 pav. Cementas naudotas tiriamojoje dalyje ROCKET CEMENT M-600	25
14 pav. Kalkės naudotos tiriamojoje dalyje OTTERBEIN gamtinės hidraulinės kalkės NHL 3,5 ..	26
15 pav. Išsijotas smėlis granuliavimo bandymams	27
16 pav. Granuliatorius naudojamas dirbtiniams užpildams gaminti	27
17 pav. Vandens tiekimas vien dulksna (kairėje), vandens tiekimas lašeliais ir dulksna (dešinėj) ..	28
18 pav. Dėl per daug didelio vandens kiekio granulės pradeda sukibti į vieną meną masę	29
19 pav. Sijavimui naudojami sietai iki 16 mm skersmens užpildams.....	29
20 pav. Slėginis indas naudojamas karbonizacijai	31
21 pav. Anglies dioksido kamera	31
22 pav. Biuretė naudojama druskos rūgšties titravimui	32
23 pav. Skalumo bandymui naudojamas presas.....	33
24 pav. Giratorius naudojamas betoninių bandinių gamybai.....	34
25 pav. Vandeniui laidaus betono gamyba	34
26 pav. Nemaltų pelenų užpildų piltinis tankis	36
27 pav. Nemaltų pelenų užpildų frakcijų pasiskirstymas.....	37
28 pav. Maltų karbonizuotų pelenų užpildų frakcijų pasiskirstymas.....	38
29 pav. Medžiagos masė prieš ir po džiovavimo	39
30 pav. Nekarbonizuotų užpildų tankis.....	40
31 pav. Karbonizuotų užpildų tankis	41
32 pav. Masės pokytis vertinant vandens įgerį	42
33 pav. Nekarbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris.....	43
34 pav. Karbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris	43
35 pav. Betoninių cilindrinų bandinių gniuždymo stipris.....	45
36 pav. Keramzitinių užpildų bandinio suirimas	45
37 pav. Cementinių užpildų bandinio suirimas.....	46
38 pav. Cementinių užpildų (kairėje) ir kalkinių užpildų (dešinėje) karbonizacijos gylio nustatymas naudojant fenolftaleiną.	46
39 pav. Vandeniui laidūs gaminiai ir jų formavimas	48

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

Doc. – docentas;

OPC – (original portland cement) įprastas portlandcementis;

IR – (infrared) infraraudoni spinduliai;

% – procentai;

fr. – frakcija;

Įvadas

Statybų srityje šiuo metu yra naudojama begalę įvairiausių statybinių medžiagų, viena iš šių medžiagų kurios pasaulyje yra – cementas. Šios medžiagos suvartojimą lėmė jos universalumas statybos srityje, nenukonkuruojamas kainos ir atliekamų darbų kokybės santykis. Betonas yra naudojamas tiek mažos apimties statybose, tiek aukščiausių dangoraižių konstrukcijose. Tačiau ši globali masinė betoninių produktų gamyba ir vartojimas nėra tobulas procesas. Betoniniam produktams pagaminti reikia didžiulių kiekių įvairių medžiagų, didžiąją dalį šių medžiagų sudaro užpildai kaip smėlis ir žvyras. Globaliai cemento yra pagaminama tarp 6 ir 21 milijardo tonų per metus, o užpildų sunaudojama betoniniam gaminiams apie 15 milijardų [1]. Moksliniuose straipsniuose minima, kad portland cementas, kuris yra viena iš svarbiausių sudedamųjų betono dalių, naudojamas jau daugiau nei 200 metų [2]. Iš šios informacijos galima suprasti, kad ši technologija gali greitai išsemti reikiamus resursus, pagrindinė to priežastis – naudojamos neatsinaujinančios medžiagos.

Sekanti problema su kuria susiduriama – didžiuliai išskiriami CO₂ dujų kiekiai gaminant cementą. Šiuo metu pasaulyje neatsinaujinančios medžiagos, bei jų greitas vartojimas, augina išskiriamo anglies dioksido kiekius, bei energijos suvartojimą [3]. Norint pagaminti cementą naudojama daug procesų kurie suvartoja daug energijos. Medžiagų kasimas, transportavimas, pagrindinių medžiagų kaip klintis ir molis apdirbimas krosnyse, siekiančiose 1450 °C temperatūrą, ir daugelis kitų procesų. Buvo nustatyta, kad kilogramui portland cementui pagaminti yra išskiriama tarp 0,66 kg ir 0,82 kg CO₂ dujų [4].

Žaliavų bei didėjančio anglies dioksido problemom spręsti yra naudojamos, bei tiriamos, įvairios medžiagos ir metodai betonui ar jo pakaitalui išgauti. Viena iš medžiagų kuri gali būti naudojama betono užpildų gamybai yra pelenai. Statistika rodo, kad utilizuojama yra tik 53,5 % pelenų, likusioji dalis lieka nepanaudota ir pašalinama netinkamai. Tyrimai rodo, kad naudojant pelenų užpildus galima išgauti stipresnius betono gaminius [6], sumažinti poringumą [7], taip pat gali padidinti karbonizacijos aktyvumą [8]. Gaminamus užpildus taip pat galima apdirbti CO₂ aplinkoje. Kartais toks apdirbimas gali duoti net geresnes savybes, nei nekarbonizuotas cementinis elementas [9].

Darbo tikslas – granuliavimo metodu pagaminti užpildus kurie būtų sudaryti iš pelenų, dalį užpildų karbonizuojant CO₂ aplinkoje.

Darbo/tyrimo uždaviniai:

1. Atliekama literatūros analizė kurioje yra išnagrinėjami metodai karbonizacijai ir granuliavimo procesams atlikti.
2. Granuliavimo procesu sudaryti skirtingų sudėčių dirbtinius užpildus ir juos karbonizuoti.
3. Pagaminti betoninius gaminius naudojant skirtingų sudėčių dirbtinius užpildus.
4. Išanalizuoti bandymų metu gautus dirbtinių užpildų ir jų betoninių gaminių rezultatus, bei juos palyginti su kitomis medžiagomis.

1. Literatūros analizė ir apžvalga

Betonas yra viena pagrindinių statybinių medžiagų šiuolaikinėje pasaulio statybos rinkoje. Ši medžiaga yra naudojama įvairiausio spektro gaminiuose, nuo smulkių betoninių produktų iki transportui skirtų kelių konstrukcijų ir dangoraižių. Pagrindinės betono sudedamos dalys, kurios yra plačiai žinomas, yra cementas, kieti užpildai ir vanduo. Cementas veikia kaip klijai apjungti naudojamoms kietoms medžiagoms, užpildams. Užpildai yra ne ką mažiau svarbi betono sudedamoji dalis, nei cementas. Užpildai gali lemti betono paskirtį, netinkamas jų panaudojimas padaryti betono gaminius netinkamus naudojimui. Užpildai sudaro didžiąją dalį betono gaminių sudėties, jiems yra sueikvojama daug resursų [1]. Užpildai yra naudojami neatodairiškai ir ilgą laikotarpį nebuvo rimtai mąstoma, kad kažkada gali patapti šie resursai ekonomiškai ar ekologiškai nepagrindžiami naudoti. Pastaruoju metu yra pradedama vis daugiau ir dažniau mąstyti apie ekologiją išgaunant šias medžiagas. Pakaitalų yra ieškoma visuose pasaulio kraštuose, vienas iš atrastų variantų yra pelenai. Pelenai yra gaunami iš gamyklų, kuriuose yra naudojama anglis, energijai gaminti, o po panaudojimo anglies atliekamoji dalis yra pelenai. Šie pelenai dažnai neturi paskirties ir jie yra laikomi kaip taršalai. Einant laikui vis labiau yra tyrinėjami pelenai ir kaip jie dera su betono gaminiais. Pastebima, kad suderinamumas tam tikruose sąlygose yra tinkamas ir net galima naudoti didelio atsparumo reikalaujančiuose konstrukcijose. Optimizavimas pelenų, bei kitų medžiagų, darant dirbtinius užpildus, gali padėti ekonomiškai t.y. žeminant kainas medžiagų reikiamų betonui išgauti ir tuo pačiu mažinant taršalų kiekį pramonėje. Kita pasaulinė problema glaustai susijusi su ką tik aptartais dirbtiniais užpildais yra anglies dioksidas kuris dažnu atveju yra kaip papildoma tarši išmetamoji dalis. Kalbant apie pelenus ir jų suderinamumą su betoniniais gaminiais, buvo atrasta kaip galima pašalinti šį anglies dioksidą šių dirbtinių užpildų pagalba. Šiuos pelenus panaudojus betoniniuose gaminiuose galima apdirbti CO₂ dujomis kurios gali pagerinti užpildo savybes. Taip bus pašalinamos neberekalingos žaliavos bei kompensuojamas anglies dioksido kiekis kuris yra išmetamas cementinių gaminių gamybos procese. Tačiau keičiant gaminių sudėtį keičiasi ir šių gaminių savybės, vienos į blogą, kitos į gerą. Prieš pradedant dirbtinių užpildų gaminimą iš pelenų ir globalų jų naudojimą turi būti atsižvelgta į daug faktorių.

1.1. CO₂ kietinimo technologija

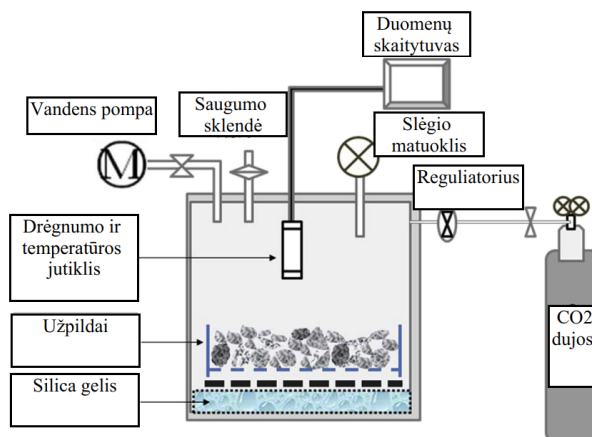
Karbonizacijos procesas dažnai nėra vertinamas dėl vykstančių reakcijų natūraliomis sąlygomis ir tai yra pagrįsta, kadangi šios reakcijos vyksta be galo lėtai ir neturi didelio efekto net per daugelį metų vykstant natūraliai karbonizacijai. Dirbtiniu būdu CO₂ paruošiant cementinius gaminius tinkamose sąlygose (tinkamas slėgis, trukmė, temperatūra, drėgnumas), dažnu atveju duoda kelias kalcio hidroksidui virsti kalcio karbonatui ir utilizuoti anglies dioksidą, bei pagerinti betono savybes [10]. Šiam dirbtiniam procesui pradėti yra naudojami keli apdirbimo metodai.

1.1.1. Autoklavinis metodas

Autoklavinio metodo pagrindinis veikimo principas yra slėgio ir temperatūros poveikis. Laikas, kurį bandiniai praleidžia šiuose slėgio ir temperatūros sąlygose, taip pat yra labai svarbus norint išgauti geriausias bandinio savybes [11]. Jau atliktuose moksliniuose tyrimuose buvo pastebėta, kad optimalus laikas yra apie 10 valandų norint išgauti didžiausią įmanomą betono, maišyto su pelenais, gniuždymo stiprį. Pastovumo nebuvo pastebėta su slėgio pokyčiais. Slėgis autoklave buvo naudojamas didesnis, kai pelenų bandinyje buvo įmaišyta daugiau, o kai buvo mažiau pelenų didesniai gniuždymo stipriui išgauti buvo naudojamas mažesnis slėgis [12]. Naudojant autoklavinį

metodą karbonizacijai CO₂ dujos būna naudojamos kartu su slėginiame tūryje esančių cementiniu gaminiu. Dažnai CO₂ kiekis būna naudojamas tarp 3 % ir 20 %.

Tačiau autoklavinis metodas plačiai žinoma, kad reikalauja kur kas daugiau energijos išteklių. Šis energijos poreikis atsiranda dėl naudojamų didelių temperatūrų ir aukšto slėgio sudaromo aparate.

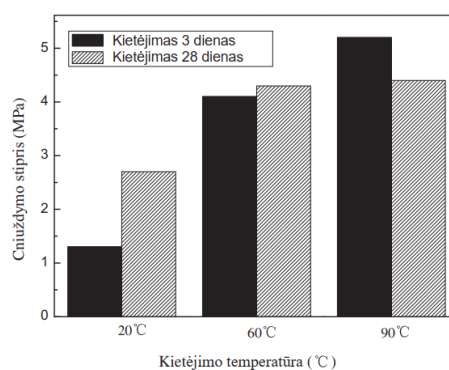


1 pav. Autoklavinio metodo aparato veikimo schema [13]

1.1.2. Beautoklavinis metodas

Šiais laikais kai yra siekiama „žalių“ technologijų yra atsižvelgiama į visas jau turimas priemones ir kaip jas būtų galima paversti mažiau energijos eikvojančiomis yra dažnai svarstoma dėl beautoklavinio metodo kuriam nereikia tokių didelių temperatūrų ar slėgio sąlygų. Jau atliktuose tyrimuose buvo pastebėta, kad įmanoma yra išgauti panašias betono sąlygas, stiprumo ir šilumos laidumo, kaip ir autoklavinio metodu [14].

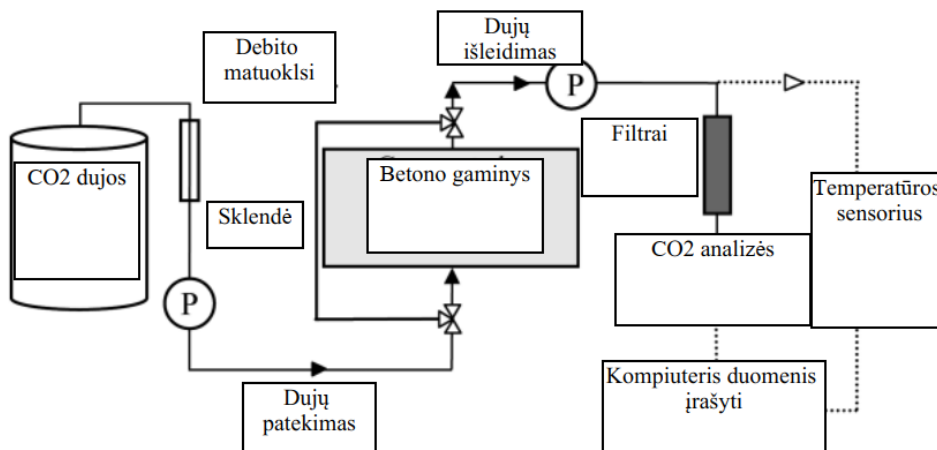
Šiame metode nėra naudojamos aukštos temperatūros tačiau variacija yra galima [15]. Moksliniame tyrime buvo atlikti trys bandymai kietinant betoną, kuriama naudojami pelenai, prie 20 °C, 60 °C ir 90 °C temperatūros. Gauti rezultatai davė įdomių pastebėjimų. Žemiau pateiktoje lentelėje galima matyti, kad betono kietėjimui aukštesnė temperatūra turėjo didesnę įtaką stiprumui po trejų dienų, tačiau praėjus 28 dienoms didelio stiprumo pokyčio nebuvo pastebėta. Energetiniu požiūriu galima matyti, kad optimali temperatūra beautoklavinio metodu didžiausiam gniuždymo stiprumui išgauti yra 60 °C [15].



2 Pav. Beautoklavinio metodo gniuždymo stiprio priklausomybė nuo temperatūros pokyčių [15]

1.1.3. Dujų srauto metodas

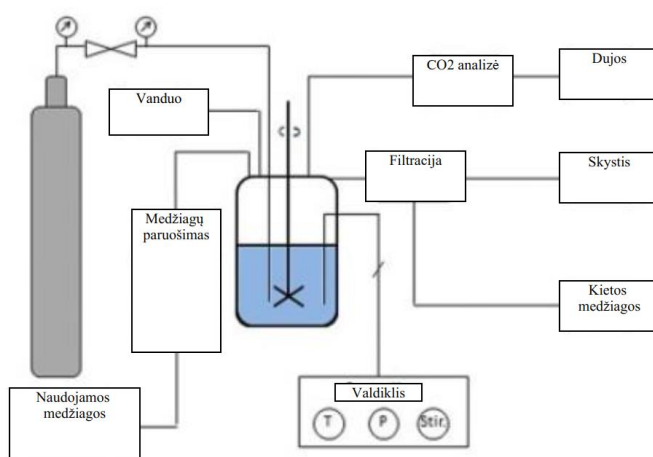
Šis dujų srauto metodas veikia uždaroje kameroje kurioje slėgio veikiamos CO₂ dujos yra nukreiptos į cementinį bandinį. Šios veikiamos CO₂ ir oro mišinio dujos yra paleidžiamos iš vienos kameros, slėgis veikia bandinį, dalis šių dujų susigeria į bandinį greičiau nei įprastais metodais, o likęs mišinys išleidžiamas kitoje pusėje. Šis karbonizacijos procesas ir jo efektyvumas priklauso nuo tiekiamo slėgio ir anglies dioksido koncentracijos srauto mišinyje [16].



3 pav. Dujų srauto aparato veikimo schema [16].

1.1.4. Vandens ir CO₂ kietinimo metodas

Taip pat yra būdas inkorporuoti vandenį į karbonizacijos procesą kuris gali dar daugiau paspartinti šį procesą [17]. Šis metodas pagrindžiamas tuo, kad reakcija vykstanti tarp CO₂ ir Ca²⁺ kalcio jonų vandens ir dujų mišinyje gali sukurti geresnes sąlygas vykti reakcijoms tarp anglies dioksido ir cementinių gaminių. Vandenyje kietinimo procesas vyksta sudedant bandinius į vandens kamerą ir tada reikalingas dujas kaip CO₂, O₂, N₂. Tokiomis sąlygomis karbonizacija yra paspartinama [17].



4 pav. Vandens ir CO₂ mišinio karbonizacijos metodas [17].

1.1.5. Bandinių hidratavimas

Prieš atliekant karbonizacijos bandymo metodus kai kuriuose straipsniuose yra rekomenduojama hidratuoti cementinius bandinius hidroksido vandens tirpaluose [18]. Atliekant bandymus su

hidratuotais bandiniais ir nehidratuotais buvo pastebėta, kad bandiniai išmirkyti tirpale turėjo geresnes savybes. Taip pat turi būti atitinkamas kiekis Ca(OH)_2 koncentracijos, kadangi optimalus procentas gavo geresnius rezultatus nei aukštesnis procentas. Taip pat optimalios koncentracijos tirpale, hidratuojant keliais ciklais, pozityviai nulėmė bandinio tirpalo sugeriamumą.

1.2. CO_2 kietinimo technologijai tinkamos medžiagos

Betoninių gaminių karbonizacija tapo aktuali dėl kylančių anglies dioksido dujų išskiriamų į aplinką. Pastebėta, kad karbonizacija vyksta su cementiniais gaminiais, tiksliau, su medžiagomis, kurios turi didelį kiekį kalcio hidroksido (gesintos kalkės) ar kalcio oksido (negesintos kalkės). Reakcija matoma 1.2.1 ir 1.2.2 formulėse kaip reakcija tarp kalkių ir aptartų dujų sudaro kalcio karbonatą CaCO_3 .



Gautas kalcio karbonatas pasižymi tuo, kad ne tik veikia kaip anglies dioksido dujų talpykla, bet ir suteikia betonui stipruminių savybių. Dėl šių dviejų pagrindinių bruožų tai yra pranašesnis betono kietinimo metodas, nei standartiniai drėgnas kietinimas [19]. Apart padidėjusio stiprumo ir buvo atkreiptas dėmesys į tai, kad sumažėja traukumo deformacijos bei vandens sugeriamumas, o tai ateityje gali suteikti daugiau betonui panaudojimo sričių [20].

Pagrindinės medžiagos kurios gali būti naudojamos karbonizacijos procesui atlikti gali būti cementas ar kalkės, kadangi jose yra daug prieš tai aptartų mineralų. Taip pat buvo pastebėta, kad daugelis perdirbtų medžiagų turi reikalingų cheminių elementų veikti kaip CO_2 talpyklos, bei veikti kartu su betoniniais gaminiais. Viena iš šių medžiagų yra kalkės. Atliktame tyrime buvo tikrinama pelenų sudėtis pagal pasaulio šalis ir taip pat galima matyti kiek CaO yra pelenuose [21].

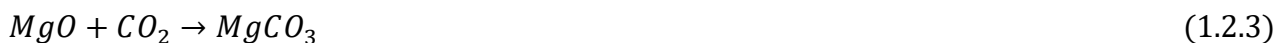
Šalis	% Cheminė sudėtis											
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	SO_3	TiO_2	Na_2O	P_2O_5	MnO	LOI
Australija	31.1-68.6	17-33	1-27.1	0.1-5.3	0.1-2.9	0-2	0-0.6	1.2-3.7	0-1.5	0-3.9	nd	na
Bagladešas	55	24.7	7.7	6.2	1.1	0.7	1.1	na	na	0.9	0.1	na
Bulgarija	30.1-57.4	12.5-25.4	5.1-21.2	1.5-28.9	0.8-2.8	1.1-2.9	0.4-12.7	0.6-1	0.4-1.9	0.1-0.4	0-0.2	0.8-32.8
Kanada	35.5-62.1	12.5-23.2	3-44.7	1.2-13.3	0.5-3.2	0.4-3.1	0.2-7.8	0.4-1	0.1-7.3	0.1-1.5	na	0.3-9.7
Kinija	35.6-57.2	18.8-55	2.3-19.3	1.1-7	0.8-0.9	0.7-4.8	1-2.9	0.2-0.7	0.6-1.3	1.1-1.5	nd	nd
Danija	48-65	26-33	3.3-8.3	2.2-7.8	na	na	na	na	1.1-2.8	na	na	3.1-4.9
Europa	28.5-59.7	12.5-35.6	2.6-21.2	0.5-28.9	0.4-4	0.6-3.8	0.1-12.7	0.5-2.6	0.1-1.9	0.1-1.7	0-0.2	0.8-32.8
Prancūzija	47-51	26-34	6.9-8.8	2.3-3.3	na	1.5-2.2	0.1-0.6	na	2.3-6.4	na	na	0.5-4.5
Vokietija	20-80	1-19	1-22	2-52	0-2	0.5-11	1-15	0.1-1	0-2	na	na	0-5
Graikija	21-35	10-17.9	4.5-8.4	27.3-45	0.4-1	1.5-3.8	4-8.6	na	0.2-1	na	na	3-7
Indija	50.2-59.7	14-32.4	2.7-16.6	0.6-9	0.2-4.7	0.1-2.3	na	0.3-2.7	0.2-1.2	na	na	0.5-7.2
Izraelis	45.6-58.6	24.4-34.5	3-6.7	4.9-9.9	0.1	1.6-2.5	0.6-0.8	1.2-1.9	0-0.1	0.8-1.8	na	6
Italija	41.7-54	25.9-33.4	3-8.8	2-10	0-2.6	0-2.4	na	1-2.6	0-1	0-1.5	0-0.1	1.9-9
Japonija	53.9-63	18.2-26.4	4.2-5.7	2-8.1	0.6-2.7	0.9-2.4	0.3-1.4	0.8-1.2	1.1-2.1	na	na	0.5-2.1
Korėja	50-55.7	24.7-28.7	3.7-7.7	2.6-6.2	1.1	0.7-1.1	0.5-1.1	na	na	0.9	0.1	4.3-4.7
Meksika	59.6	22.8	5.6	3.1	1.3	0.9	0.4	0.9	0.5	0	na	na
Olandija	45.1-59.7	24.8-28.9	3.3-9	0.5-6.8	0.6-2.9	0.6-3.7	0.2-1.3	0.9-1.8	0.1-1.2	0.1-1.5	0-0.1	2.7-8.1
Šiaurinė Kinija	43.7	44	3.5	0.9	0.9	0.4	0.7	1.5	0.3	na	na	10
Lenkija	32.2-53.3	4-32.2	4.5-8.9	1.2-29.9	0.2-3.3	1.2-5.9	na	0.6-2.2	0.2-1.5	0.1-0.9	0-0.3	0.5-2.8
Rusija	40.5-48.6	23.2-25.9	na	6.9-13.2	1.9-2.6	2.6-4	na	0.5-0.6	1.2-1.5	0.3-0.4	0.2-0.4	na
Pietų Afrika	46.3-67	21.3-27	2.4-4.7	6.4-9.8	0.5-1	1.9-2.7	na	1.2-1.6	0-1.3	0.3-0.9	0-0.5	na
Ispanija	41.5-58.6	17.6-45.4	2.6-16.2	0.3-11.8	0.2-4	0.3-3.2	0.1-2.2	0.5-1.8	0-1.1	0.1-1.7	0-0.1	1.1-9.7
Ispanija	41.5-58.6	17.6-35.6	2.6-16	0.8-11.8	0.4-4	0.9-2.5	0.1-2.2	0.5-1.6	0.2-0.8	0.1-1.7	0-0.1	1.1-5.2
Turkija	37.9-57	20.5-24.3	4.1-10.6	0.2-27.9	0.4-3.5	1-3.2	0.6-4.8	0.6-1.5	0.1-0.6	0.2-0.3	0	0.4-2.7
UK	34.9-58.5	19.1-28.6	3.2-25.5	0.7-22.4	0.9-2.9	0.5-4.8	0.1-2.1	1-1.6	0.2-1.8	0.1-1.3	na	0.2-20.5
Minimumas	20.0	1.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Maksimumas	80.0	55.0	44.7	52.0	4.7	11.0	15.0	3.7	7.3	3.9	0.5	32.8

Pastabos: nd = nepastebėta na = nėra duomenų.

5 pav. Pelenų cheminė sudėtis pagal kilmę iš skirtingų šalių [21]

Europoje buvo aptikta vidutiniškai tarp 0,5 ir 28,9 % CaO bandinių cheminėse sudėtyse. Bendru pasaulio mastu režiai svyruoja tarp 0.1 % ir 52% [21]. Pagal šią informaciją galima teigti, kad ne visi pelenai gali būti naudojami kaip užpildas betoniniuose gaminiuose atliekant karbonizaciją, labai svarbu yra atkreipti dėmesį į jų sudėtį.

Taip pat yra žinoma, kad anglies dioksido karbonizacijos reakcija veikia kartus su magniu, o tai gali duoti geresnes sąlygas sugerti daugiau CO₂ dujų, gaunant geresnį norimą rezultatą. Ši reakcija veikia panašiai kaip ir su kalkėmis sudarydama magnio karbonatą kuris atlieka panašias funkcijas.



Magnio oksidų galima rasti taip pat nemažus kiekius pelenuose. Iš to pačio tyrimo galima matyti kiek būtent magnio oksido galima juose rasti [17]. Europoje šis procentas gali svyruoti nuo 0.6% iki 3.8%. Imant pasaulinį minimumą ir maksimumą jo galima aptikti tarp nuo 0.0% iki 11%. Tai nėra dideli procentai lyginant su kalcio oksidais, tačiau jų reaktyvumas leidžia jiems būti išskirtiems šiuose tyrimuose.

Medžiagos kurios reaguoja su anglies dioksido dujomis buvo specialiai atrinktos ir tyrinėjamos išsamiau dėl šios savybės, tačiau jos yra per daug reaktyvios, kad galėtume jas rasti natūraliai slūgsančias gamtoje [22]. Žinant šį faktą yra labai svarbu atrinkti gaminius arba produktus kurie jau turi didelį kiekį šių cheminių junginių.

Įdomus pastebėjimas buvo atliktas tyrime kuriame buvo nustatyta, kad būtent šios dvi aptartos medžiagos yra vienos tinkamiausių, norint atlikti karbonizacijos reakcijai [22]. CaO ir MgO minima, kad yra idealūs cheminiai junginiai karbonizacijai, kadangi vykstančios reakcijos išskiria daugiausiai šilumos.



Šios reakcijos ir jų išskiriami šilumos kiekiai leidžia matyti, kad kalcio oksidas yra tinkamesnis karbonizacijai, juolab, kad jo galima rasti kur kas didesniais kiekiais minimuose pelenuose.

1.3. Dirbtinių užpildų gamyba kietinant CO₂ aplinkoje bei poveikis betonui

Norint suprasti suformuotus kalcio karbonatus kurie buvo apdribti CO₂ aplinkoje reikia gerai išmanyti kaip veikia ir nuo ko priklauso ši technologija. Karbonizacijai didelę įtaką daro anglies dioksido dujų slėgio pokyčiai bandinio aplinkoje. Taip pat ne tik slėgis, bet ir pačių dujų koncentracija lemia galutinį bandinio rezultatą [23]. Temperatūros pokyčiai taip pat turi įtakos, bet ne tiek kaip kiti aspektai [23]. Taip pat yra ir kitų sąlygų kurios turi būti kontroliuojamos, norint gauti geriausius rezultatus.

1.3.1. Anglies dioksido dujų koncentracijos įtaka karbonizacijos lygiui

Viename aktualiame tyrime apie mikrostruktūrą OPC karbonizuojant skirtingose dujų koncentracijose tarp 3 % ir 20 %, aptariamos sąlygos ir gauti rezultatai [24].

1 lentelė. Tyrime naudoto cemento cheminė ir mineralinė sudėtis nustatyta su rentgeno spinduliavimu (w/%) [20]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
21,91	5,31	3,67	64,5	1,51	0,62	0,19	2,08	59,0	16,2	6,8	11,7

Iš pateiktos lentelės cemento cheminės sudėties galima matyti, kad cemente yra nemaža dalis kalcio oksidų kurie gali puikiai reaguoti su anglies dioksidu esant tinkamomis sąlygomis.

Bandymo paruošimo metu buvo sudaryti 40x40x40 mm kubeliai kurie buvo laikomi 18 valandų kambario temperatūroje. Po to iš karto įdėti į kamerą karbonizuoti gaminiams esant 60 % drėgmės, 20 laipsnių Celsijaus temperatūros ir 0,1 MPa slėgio kietėjimui skirtingose anglies dioksido judų koncentracijose po 6 valandas. Šie bandiniai buvo testuojami skirtingais kietėjimo tarpsniais [24].

Koncentracijos įtaka parodė, kad skirtumas po 6 valandų kietinimo anglies dioksido dujose turėjo teigiamą įtaką betono stiprumui. Buvo palyginti visiškai be jokios karbonizacijos bandiniai su karbonizuotais bandiniais esant 3 % ir 20 %, nekarbonizuoti bandiniai pasiekė 16,1 MPa, o karbonizuoti 17,9 MPa.

Kitame tyrime buvo atliekami bandiniai, pakeliant dujų koncentraciją iki 100 % [25]. Buvo pastebėta, kad yra optimali koncentracijos reikšmė, kurią peržengus negaunama tolimesnių sparčiai augančių rezultatų. Skirtumas tarp dujų koncentracijos nuo 10 % iki 100 % ir anglies dioksido sugerties buvo menkas. Lyginant šiuos du variantus, skirtumas buvo tik 9,1 % po 24 valandų. Norint bandiniuose per kuo trumpesnę laiką efektyviai pašalinti kuo daugiau anglies dioksido dujų, rekomenduojama naudoti tarp 10 % ir 20 % dujų mišinio koncentracijos.

1.3.2. Karbonizacijos lygio nustatymas

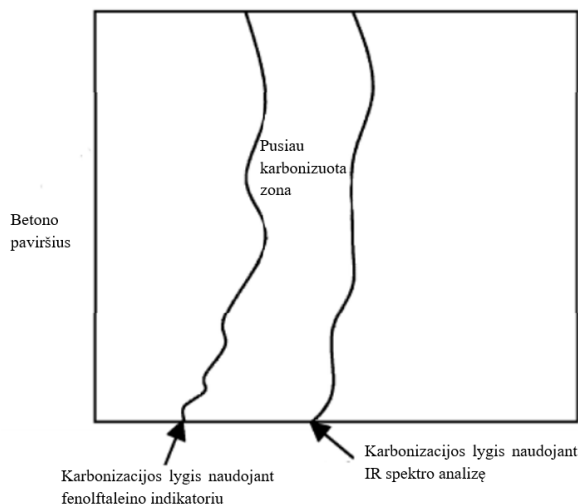
Dažniausiai nustatinėjant bandinio karbonizacijos lygį bei prasiskverbimo gylį yra naudojamas fenolftaleinas. Šis metodas parodo spalvomis, kurios bandinio vietos buvo ar nebuvo paveiktos karbonizacijos, o kurios buvo pilnai koncentruotos, o tame sluoksnyje PH lygis siekia apie 9 [26].



6 pav. Karbonizacijos paveikti bandiniai paryškinant ją fenolftaleinu, kairėje po 12 valandų kietėjimo, dešinėje po 27 dienų [27].

Tačiau kitame atliktame tyrime buvo pastebėta, kad fenolftaleinas gali būti ne visiškai tikslus kaip buvo manoma [26]. Šis tyrimas buvo atliktas naudojant infraraudonų spindulių spektroskopą ir lyginamas su standartiniu metodu. Karbonizacijos skirtumas buvo aptiktas ir išvada padaryta, kad fenolftaleinas nesugeba aptikti visos medžiagos, kuri buvo paveikta anglies dioksido dujų reakcija, o

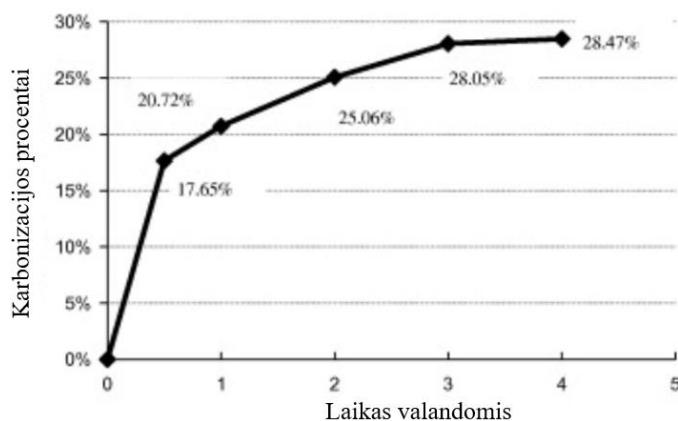
IR spektroskopas aptiko tikslesnius rezultatus, kurie parodė, kad bandinys iš tiesų buvo paveiktas labiau nei numanyta. Skirtumas tikslumo buvo nustatytas, nes 23,9 %, o tai gali lemti galutinių rezultatų tikslumą.



7 pav. Karbonizacijos modelis nurodantis skirtumą tarp dviejų patikrinimo metodų [26].

1.3.3. Karbonizavimosi laiko įtaka

Siekiant nustatyti įtaką bandinio karbonizavimuisi, buvo atliktas bandymas [28]. Šiame bandyme buvo nustatyti penki skirtingi laikai, veikiami tų pačių sąlygų. Šio bandymo metu gauti rezultatai parodė, kad karbonizacijos procentas didžiausią šuolį padarė pirmąją pusę valandos, pakildamas iki 17,65 %. Antrąją valandą buvo pasiekti 25,05 %, o tolimesnis kietėjimas anglies dioksido prisotintoje aplinkoje davė vis mažėjančius karbonizavimosi lygius, ties ketvirta valanda buvo pasiekta 28,47 %.



8 pav. Karbonizacijos procentas laiko atžvilgiu [28].

1.3.4. Užpildo dalelių dydžio įtaka karbonizacijai

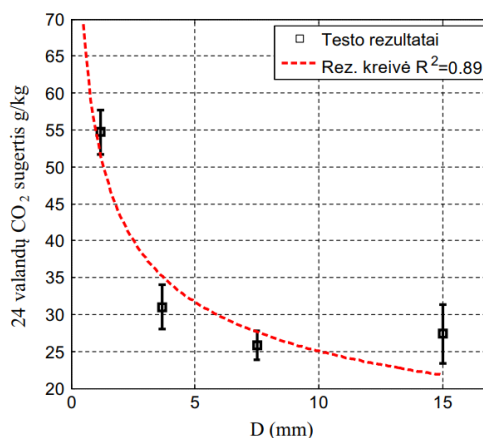
Taip pat buvo pastebėta, kad mažesnių dalelių karbonizavimosi lygis per tam tikrą laiką buvo kur kas didesnis lyginant su didesnių dalelių bandiniais [25]. Šiame tyrime matoma, kad kuo mažesnės frakcijos užpildai yra naudojami, tuo daugiau yra cemento kiekio bandinyje. Didelis cemento kiekis galėjo lemti aukštesnį procentinį kalcio karbonatų kiekį, o tai reiškia, kad yra didesnis kiekis medžiagų kurios reaguoja su CO₂ dujomis.

2 lentelė. Tyrimo bandinių duomenys [25].

Bandinio Pavadinimas	Dydis, mm	Tankis, kg/m ³	Vandens įgeris, %	Cemento kiekis, %
RCA I	10–20	2587	6,19	11,2
	5–10	261	6,22	16,83
	2,36–5	2610	14,98	22,47
	<2,35	2572	16,44	24,01
RCA II	5–10	2671	5,23	14,24
	2,36–5	2591	14,53	18,43

Taip pat bandiniai su didesnėmis užpildo frakcijomis lėmė lėtesnę karbonizacijos procesą [25]. Šią priklausomybę galima matyti toliau pateiktame paveikslėlyje. Ši priklausomybė yra tinkama tik tais atvejais kai betoninis gaminy yra perdirbtas nededant jokių papildų, tai lemia atliekant karbonizacijos procesą anglies dioksido dujoms yra sunkiau prasiskverbti. Kitas svarbus faktorius yra pačių dalelių naudingas plotas kuris yra veikiamas dujų, kadangi ta pati masė stambesnio užpildo bus paveikiama mažesniu kiekiu anglies dioksido, o mažesnės frakcijos užpildai sugers daugiau per trumpesnę laiko tarpą. Pašaltini šiai problemai galimas variantas yra karbonizuoti šiuos užpildus prieš sudedant juos į betoninį mišinį ir jei yra galimybė susmulkinti užpildų daleles. Tai lemtų didesnę kiekį sugeriamų CO₂ ir galimai stipresnius bandinius.

Priklausomybė nuo pačių užpildų sudėties taip pat yra didelė. Jei užpildai būtų specialiai paruošti naudojant didelius kiekius medžiagų kurių cheminė sudėtis turi pakankamai kalcio ar magnio oksidų, hidroksidų, tai gaminių sugeriamą CO₂ kiekį būtų įmanoma padidinti iki dar didesnių skaičių. Vienas iš pavyzdžių būtų ankstesniuose skyriuose aptarti pelenai.



9 pav. Dalelių dydžio efektas anglies dioksido sugerčiai [25]

1.3.5. Temperatūros įtaka karbonizacijai

Aukštesnė temperatūra chemijoje dažniausiai lemia greitėjančias reakcijas tarp elementų ar cheminių junginių, o tai gali lemti greitesnį siektino rezultato gavimą. Mažesnė temperatūra veikia dažniausiai atvirkštiniu principu lėtinant reakcijas. Tačiau ne visada greitesnės reakcijos gali reikšti greitesnius ir geresnius rezultatus. Kaip ir buvo galima nuspėti karbonizacijos procese vykstančios reakcijos taip pat yra veikiamos temperatūros pokyčių. Tyrime buvo karbonizuojami bandiniai skirtinguose temperatūrose nuo 20 °C iki 80 °C [29]. Testuojant bandinius tikrinant jų karbonizacijos lygius buvo

nustatyta, kad procentiniai lygiai svyravo tarp 52,6 % ir 55 %. Nors skirtumas yra nemažas, tačiau tame pačiame straipsnyje autoriai rekomenduoja reakciją vykdyti iš dalies mažoje temperatūroje, kad būtų sudaromi stabilesni cheminiai junginiai. Stabilumas šiuo atveju galimai duotų ilgaamžiškesnius gaminius kurie veiktų kaip anglies dioksido talpyklas.

1.3.6. Perdirbamų medžiagų savybių įtaka

Lakieji pelenai yra vienas iš daugelio perdirbamų medžiagų variantų. Šie pelenai dažniausiai skirstomi į C ir F klases. C klasė yra žinoma kaip medžiaga turinti didelį kiekį kalcio turinio. F klasė žinoma kaip turinti mažą kiekį kalcio turinio. Karbonizacijos lygiui padidinti naudojama C klasės pelenai, kuriuose didesnis kiekis kalkių gali sureaguoti su anglies dioksidu sudarant kalcio karbonatą. F klasės pelenai nėra tinkami kaip cemento pakaitalas, dažniau pasirenkama kaip užpildo pakaitalas smėliui ar skaldai [21].

1.3.7. Karbonizacijos poveikis betono pH lygiui

Karbonizacijos korozija yra dažnai girdima frazė susiduriant su gelžbetoninėms konstrukcijomis. Karbonizuojant laboratorijose ar gamyklose ši problema išlieka aktuali. Karbonizuojamas betonas gali tapti prastesnė apsauginė terpė plieno armatūrai. Įprastai betonas būna šarminis tarp 12-13 pH, karbonizuotas betonas kai kuriais atvejais pasiekia 9,2 pH [27].

1.3.8. Karbonizacijos poveiki betono poringumui

Vykstant anglies dioksido ir kalcio hidroksido reakcijai dažniausiai tai vyksta porose, kuriuose gali būti vandens, sudarant kalcio karbonato mišinį kurios užpildo šias poras. Šis reiškinys yra ištirtas tyrime kuriame buvo karbonizuotas tik betono paviršutinis sluoksnis [27]. Paveikiant dalį betono apsauginio sluoksnio yra uždarnos paviršutinės poros ir taip užkertamas kelias tarpusavyje sujungtoms poroms. Esant karbonizuotam paviršiui yra užkertamas kelias patekti vandens, deguonies, chloridams ar kitiems kenksmingiems elementams. Tai yra įrodyta tyrime kuriame buvo karbonizuotas apie 10 mm bandinio apsauginio sluoksnio. Šis bandinys buvo cikliškai veikiamas chloridų tirpalais ir po 33 mėnesių buvo palygintas su karbonizuotas ir nekarbonizuotas bandinys. Rezultatai parodė, kad bandinys kuris nebuvo paveiktas anglies dioksido dujų kietinimo metu turėjo stiprių korozijos požymių, o bandinys kuris buvo karbonizuotas neturėjo arba turėjo labai menkus karbonizacijos požymius [27]. Tai duoda aiškų patvirtinimą, kad poros yra uždarnos ir sulėtinamas chloridų patekimas į gilesnius betono sluoksnius.

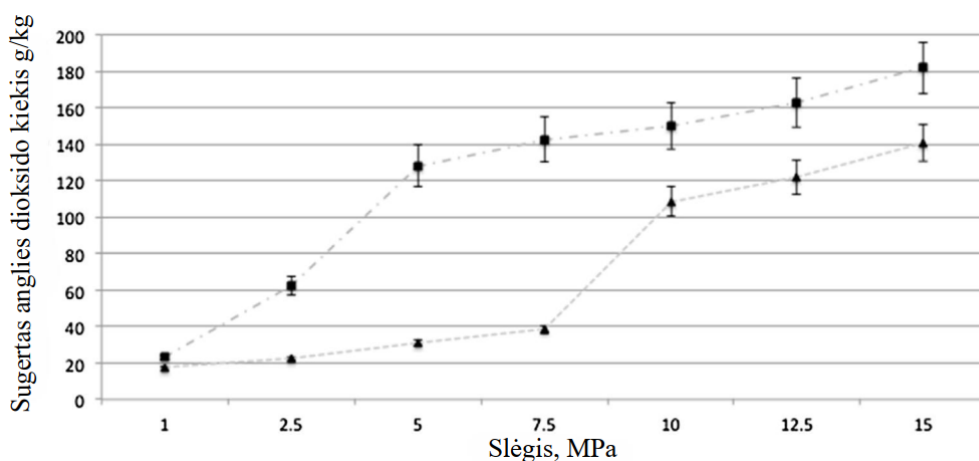
1.4. CO₂ utilizacija

CO₂ utilizacija gali būti matuojama bent poroje skirtingų scenarijų: kai yra dirbtinai apdirbamas gaminys ir kai yra natūraliuose sąlygose karbonizuojamas gaminys.

Pirmame tyrime buvo atliekami ilgalaikiai bandiniai naudojant pelenus natūraliuose sąlygose kurie truko 28 dienas, 1 metus, 3 metus, 5 metus ir 10 metų [31]. Jų karbonizacijos gylis buvo matuojamas purškiant fenolftaleiną ant bandinių. Rezultatai buvo ganėtinai įdomūs, kadangi buvo palyginti gaminiai su pelenais tarp 25 % ir 55 % bei bandiniai be pelenų. Po dešimties metų galima buvo aiškiai matyti, kad bandiniai su pelenais buvo kur kas giliau karbonizuoti, nei bandiniai be pelenų. Bandinyje kuriame buvo įdėta 55 % pelenų nuo visos masės buvo karbonizuotas giliau, net 167 % daugiau nei bandinyje be pelenų. Prie 55 % buvo išmatuotas 20,25 mm karbonizavimosi gylis, o prie 0% buvo išmatuotas 12,09 mm karbonizavimosi gyliu. Norint utilizuoti kuo daugiau anglies dioksido

natūraliai, be papildomų dirbtinių kietinimų CO₂ kameroje, būtina yra įdėti tam tikrą dalį pelenų į betono mišinį. Tame pačiame bandyme buvo taip pat išmatuotas gniuždymo stipris ir gauta, kad bandiniuose su daugiau pelenų buvo gaunamos didesnės gniuždymo stiprio reikšmės laikui einant, o tai reiškia, kad su laiku betoniniai gaminiai turėtų būti vis stipresni, net labiau nei betonas be pelenų.

Taip pat buvo atlikti tyrimai dirbtiniuose sąlygose kuriuose buvo nustatytas tikslus anglies dioksido utilizacijos kiekis [32]. Šiame bandyme buvo atlikti tyrimai naudojant pelenus betoniniuose gaminiuose, bei karbonizuojant naudojant skirtingo dydžio slėgį. Slėgis buvo naudojamas tarp 1 MPa ir 15 MPa. Buvo aiškiai galima matyti kaip kinta CO₂ įgeriamumas keičiantis slėgio dydžiui.



10 pav. Sugerto anglies dioksido kiekis priklausomai nuo slėgio prie 25°C (▲) ir 45 °C (■) temperatūros [32].

Iš šių rezultatų galime spręsti, kad pelenų panaudojimas betoniniuose gaminiuose yra geras būdas sulaikyti anglies dioksidą bandiniuose. Iš anksčiau pateikto grafiko yra matoma, kad prie 25 °C ir 45 °C laipsnių temperatūros buvo sugerta 140,6 g/kg ir 181,8 g/kg [32]. Pagal kitame straipsnyje pateiktą informaciją galima matyti apytikslį CO₂ kiekį išskiriamą gaminant atitinkamas betono klases [33].

3 lentelė. Anglies dioksido išskiriamas kiekis atitinkamai betono klasei [33].

Medžiaga	Betonas			
	C25	C40	C60	C80
CO ₂ atitinkamas kiekis, kg/m ³	215	272	350	394

Iš anksčiau pateiktos lentelės duomenų galima išsireikšti, kad C25/30 klasės betonui pagaminti išskiriama apie 86 g/kg CO₂ dujų, įvertinant, kad betono tankis 2500 kg/m³. Karbonizuotas betonas gali sugerti 140,6 g/kg anglies dioksido dujų, tai reiškia, kad betonas teoriškai gali būti ekologiškai racionalus sprendinys mažinant anglies dioksido kiekius aplinkoje. Įvertinant betono gamyboje išskiriamą anglies dioksido kiekį ir iš to kiekio atimant karbonizacijos procese sugeriamą kiekį, tai galutinėje sumoje betonas pašalina 54,6 g/kg nenaudingų dujų. Žinoma šie duomenys buvo gauti laboratorijoje prie tobulų sąlygų. Taip pat visi betonai turi būti apdirbti skirtingai ir nevisi betoniniai gaminiai gali būti apdirbti tokiomis pačiomis sąlygomis. Tame pačiame straipsnyje yra minima, kad į skaičiavimus nėra įtraukiama karbonizacijos procese sunaudojama energija, bei nėra žinoma ar į

aukščiau pateiktos lentelės duomenis buvo įvertinta logistiniai sprendiniai, bei pačios statybos veiksmai kurie išskiria anglies dioksidą.

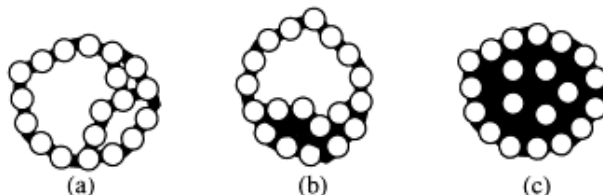
1.5. Dirbtinių užpildų gamybos technologijos

Betoninių užpildų granuliavimo procesas yra apibūdinamas kaip smulkių dalelių aglomeracija. Šios smulkios dalelės dažniausiai turi savo sudėtyje cementinių savybių kurios leidžia tarpusavyje sukibti. Jei yra naudojamos nekibios dalelės, tai tuo atveju yra naudojami rišikliai kaip cementas ar kalkės padidinti sukibimui tarp smulkių dalelių.

Šis granuliavimo procesas yra atliekamas naudojant sukamą disko pavidalo indą kuriame yra suberiamos smulkios medžiagos dalelės ir šiame inde tos dalelės yra drėkinamos.

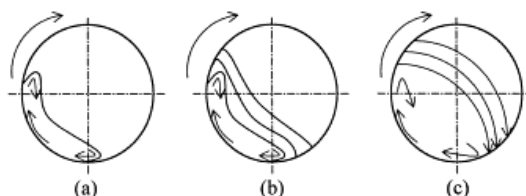
Granuliavimui gali būti naudojamos įvairios smulkios medžiagos kaip šlakai, molis ar lakieji pelenai. Lakieji pelenai, būtent C klasės, pasižymi didesniu kalkių kiekiu, todėl jų aglomeracijos procesas granuliavimo metu yra spartesnis ir reikalaujantis mažiau cemento ar kalkių. Medžiagai kaip smėliui – cementas arba kalkės yra būtinas priedas. Naudojant F klasės pelenus gali būti pasiektas panašus rezultatas tačiau reikalaujantis didesnio kiekio rišiklių.

Granuliavimo procesas veikia kai smulkios, pasirinktos medžiagos, dalelės yra sudrėkinamos, tarp šių dalelių susidaro plona skysta plėvelė dalelių paviršiuje. Ši plėvelė sudaro meniską tarp šalimais esančių dalelių ir sukuria sujungimus tarp jų (žiūr. pav. 11 a.). Kai šios dalelės yra sukamos granuliavimo diske, jos sudaro apvalią formą dėl pastovaus sukimo ir jų ridenimo, veikiant gravitacinėms bei išcentrinėms jėgom (žiūr. pav. 11 b., c.).



11 pav. Smulkių dalelių granuliavimosi procesas [34]

Granuliavimo metu dirbtinių užpildų susidarymo greičiui ir jų dydžiui turi didelį poveikį granuliavimo disko sukimosi greitis. Pastebėta, kad prie mažų apsisukimo greičių dirbtinių užpildų judėjimas yra pagrinde veikiamas gravitacinių jėgų, o prie didelių apsisukimų dažnių dominuoja išcentrinė jėga. Gerai granulių gamybai reikia, kad būtų vidutinis greitis, kadangi prie lėtų sūkių gaunasi netvirtos dalelės, o prie greitų granuliavimas gali visiškai nevykti [34]. Dažniausiai priimama, kad apsisukimų greitis per minutę turėtų būti tarp 35 ir 55.



12 pav. Medžiagų pasiskirstymas granuliavimo diske priklausomai nuo sukimosi greičio. a – žemas greitis, b – vidutinis greitis, c – didelis greitis [34].

Sekantis svarbus aspektas optimaliam granuliavimo procesui gauti yra disko pokrypio kampas. Šis parametras lemia kaip pasiskirsto dalelės diske, bei gali paveikti pagrindinių jėgų veikiančių granules pasiskirstymą, labiau gali veikti gravitacinės arba išcentrinės jėgos. Optimalus kampas yra tarp 40 ir 50 laipsnių.

1.6. Dirbtinių užpildų panaudojimas

Dirbtinai užpildai dažnu atveju pasižymi mažesniu tankiu nei natūraliai išgauti užpildai. Kadangi betoninių gaminių gamyboje šie užpildai dažniausiai užima 60-80 procentų tūrio, tai pamažinant tankį šių užpildų būtų sumažinamos savojo svorio apkrovos kurias turi perimti pastato konstrukcijos ir pamatai, galutinėje bendroje sumoje sumažinant išnaudojamo betono kiekį, bei tuo pačiu mažinant išskiriamą anglies dioksido kiekį gamybos procese [35] [36].

2. Naudojama metodika ir medžiagos

2.1. Naudojamų standartų sąrašas

Magistro tiriamajame darbe vadovaujamosi pateiktais standartais:

- LST EN 13055:2016. Lengvieji užpildai.
- LST EN 197-1:2011. Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai.
- LST EN 459-1:2010 Statybinės kalkės. D. 1, Apibrėžtys, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai.
- LST EN 932-1:2001 Užpildų pagrindinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Ėminio ėmimo metodai.
- LST EN 1097-5:2008. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 5 dalis. Vandens kiekio nustatymas džiovinant ventiliuojamoje krosnyje.
- LST EN 1097-6:2022. Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 6 dalis. Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas.
- LST EN 13055-1:2004. Lengvieji betono, skiedinio ir injekcinio skiedinio užpildai.
- LST 1476.7:1997. Betono ir skiedinio užpildai : bandymo metodai : stiprumo nustatymas

2.2. Tiriamojoje dalyje naudotos medžiagos

2.2.1. Cementas

Vienas iš pasirinktų rišiklių tiriamajame darbe buvo CEM-1 42.5R portlancementas, jis pasižymi universalumu įvairios paskirties betoniniams gaminiams. Pagal jo žymėjimą jis yra išskiriamas prie greičiau kietėjančių cemento mišinių, o gaminant užpildus granuliavimo būdu tai yra svarbus aspektas. Jo rišimosi pradžia yra 180 minučių [37]. Kadangi reikia vis dar nesukietėjusius užpildus sandėliuoti dažniausiai dideliais kiekiais, tai ankstyvas stiprumas yra svarbus dalykas norint užtikrinti granuliuojamumą kietėjimo laikotarpiu.



13 pav. Cementas naudotas tiriamojoje dalyje ROCKET CEMENT M-600

Šis cementas pagal gamintojo pateikiamus duomenis atitinka LST EN 197-1:2011 standarto keliamus reikalavimus [38].

4 lentelė. ROCKET CEMENT M-600 stipruminės savybės po atitinkamo kietėjimo periodo [37].

	1 para	2 paros	7 paros	28 paros
Stiprumas, Mpa	20	32	45	56

2.2.2. Kalkės

Antroji rišamoji medžiaga buvo pasirinkta – kalkės. Šiuo atveju naudojamos OTTERBEIN gamtinės hidraulinės kalkės NHL 3,5 vidutinio tankumo kalkės. Pasižymi, kad šis rišiklis yra neturintis cemento ir dideliu laidumu vandens garams. Svarbiausias šios rišiklio sudėties dalis yra ta, kad turi daugiau nei 32% kalcio hidroksido $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o tai leis granulėms su šiuo rišikliu karbonizuotis efektyviau nei su cementiniu [39].



14 pav. Kalkės naudotos tiriamojoje dalyje OTTERBEIN gamtinės hidraulinės kalkės NHL 3,5

Šios kalkės pagal gamintojo pateikiamus duomenis atitinka LST EN 459-1:2010 standarto keliamus reikalavimus [40].

5 lentelė. OTTERBEIN gamtinės hidraulinės kalkės NHL 3,5 stipruminės savybės po atitinkamo kietėjimo periodo [39].

	28 paros	6 mėn,	12 mėn,
Stiprumas, Mpa	4,8	8,5	10,5

2.2.3. Smėlis

Smėlis šiame tyrime naudojamas kaip medžiaga kurią naudojame pradiniams granuliavimo bandymams atlikti netęsiant stipruminių savybių tikrinimo. Šis smėlis yra išsijojamas smulkia frakcija 0/1 mm dėl geresnio granuliavimo sukibties.



15 pav. Išsijotas smėlis granuliavimo bandymams

2.2.4. Pelenai

Šiame tyrime pelenai buvo naudojami perdirbant juos į dirbtinius užpildus kurie galėtų pilnai arba dalinai pakeisti natūralius užpildus kaip smėlis ar žvirgždas.

Šie pelenai buvo pasirinkti ir atgabenti iš Vilniaus bei Kauno kogeneracinės jėgainių, kuriuose atsirinkom tinkamus pelenus iš susidariusių atliekų. Jie buvo renkami vadovaujantis pagal LST EN 932-1:2001 [41] standartą.

2.3. Metodai naudoti tiriamojoje dalyje

Toliau pateikti metodai yra naudojami nustatyti perdirbtų pelenų užpildų savybes.

2.3.1. Granuliavimas

Granuliavimui nebuvo rasta standarto todėl vadovaujamosi bendromis nuostatomis standarte LST EN 13055:2016 [42].

Dirbtinių užpildų gaminimo metu buvo naudojamas granulatorius (žiūr. pav. 16.). Jis veikia aglomeracijos principu, medžiagos sulimpa vienos su kitomis sudarant apskritimo formos daleles. Aglomeracijai vykti yra būtina rišamoji medžiaga, šiuo atveju perdirbtiems pelenams surišti naudojamas yra cementas ir kalkės.



16 pav. Granulatorius naudojamas dirbtiniams užpildams gaminti

Procesas prasideda pelenus ir rišamąją medžiagą viename inde gerai sumaišant. Šiuo atveju vandens kiekis negalėjo būti sumažintas, kad išgauti geresnes stiprumines savybes sumažinant vandens ir rišiklio santykį.

6 lentelė. Granulių gamybai naudojama mišinio sudėtis 1 m³

Medžiaga	Pelenai, kg	Rišiklis, kg	Vanduo, kg
Pelenai + cementas (PC)	598,5	149,6	149,6
Pelenai + kalkės (PK)	555,1	138,8	138,8
Malti pelenai + kalkės (MPK)	591,5	154,2	147,9
Malti pelenai + cementas (MPC)	644,5	161,1	161,1

Mišinys yra supilamas į granuliatorių, nustatomas atitinkamas maišymo kampas, greitis, tiekiamas vanduo.

Mišymo kampas. Atliekant granuliavimo procesą parenkamas kampas kuris būtų tarp 40 ir 50 laipsnių. Priėmus mažesnę kampą dažnu atveju buvo pastebėta, kad mišinys sunkiau rieda, to pasekoje aglomeracijos procesas nevyksta. Didesnis kampas gali kelti problemų dėl mažų sienelių, galimas granulių iškritimas, bandinių sugadinimas.

Maišymo greitis. Maišymo greitis nustatyta, kad optimalus buvo apie 45 apsisukimus per minutę. Išbandžius didesnius greičius pastebėtas suprastėjęs aglomeracijos procesas. Pradeda veikti didesnės išcentrinės jėgos ir susidarius granulės greitai suyra.

Vandens patiekimas. Vandens patiekimą optimalu yra paskirstyti viso gaminimo proceso eigoje. Nerekomenduojamas viso vandens supylimas iš karto į mišinį, dėl to gali gautis skirtingų frakcijų dalelės, nebus rezultatų vientisumo. Geriausi rezultatai buvo pastebėti kai vanduo yra patiekiamas purškiant dulksna, išgaunant labai smulkios frakcijos granules 0-4 mm, arba pradant maišymą mažais lašeliais ir po to tiekti dulksną taip paskirstant vandens kiekį per visą mišinį tolygiai ir išgaunant didesnės frakcijos 4-16 mm daleles (žiūr. pav. 17).



17 pav. Vandens tiekimas vien dulksna (kairėje), vandens tiekimas lašeliais ir dulksna (dešinė)

Vandens kiekis. Vandens kiekis buvo parinktas kuo mažesnis norint išlaikyti kuo geresnes stiprumines savybes. Dėl per mažo vandens kiekio aglomeracijos procesui vykti pritrūko sukibimo, daug mišinio liko nesukibusio. Naudojant per daug, apie dvigubai daugiau nei rišiklio kiekis, vandens granulių išgauti nepavyko, susidarė vientisa masė kuri šiam procesui yra netinkama.



18 pav. Dėl per daug didelio vandens kiekio granulės pradeda sukibti į vieną meną masę

2.3.2. Drėgnio nustatymas

Drėgnio nustatymo bandymai buvo atliekami vadovaujantis LST EN 1097-5:2008 [43]. Norint patikrinti drėgnumą bandiniai buvo pasverti ir įdėti į krosnį džiovinimui prie 65 °C temperatūros. Džiovinti bandiniai buvo palikti 24 valandas. Išimti bandiniai buvo iš karto pasverti taip išvengiant užpildams papildomai įgeriamo vandens.

Drėgnis skaičiuojamas pagal formulę [44]:

$$W_m = \left(\frac{m_1 - m}{m} \right) \cdot 100 ; \quad (2.3.1)$$

Čia: m_1 – drėgnos medžiagos masė, g;

m – išdžiovintos medžiagos masė, g;

2.3.3. Piltinio ir tikrojo tankio nustatymas

Užpildų piltinis tankis nustatomas norint įvertinti ir palyginti su kitomis jau esanomis medžiagomis. Piltinis tankis buvo nustatomas visų sudėčių granulėms.

Granulės buvo sijojamos sietais ir išskaidomos frakcijomis tarp 0/16 mm, didesnės frakcijos tyrime nėra naudojamos.



19 pav. Sijavimui naudojami sietai iki 16 mm skersmens užpildams

Piltiniam tankui nustatyti buvo naudojamosi ir vadovaujamosi LST EN 1097-6:2022 [45] standartu.

Pradžioje buvo pasvertas 1 litro indas kuriame bus beriami užpildai ir matuojamas jų piltinis tankis. Į šį indą užpildai yra pilami kol pasiekia indo viršų ir tada perteklius yra nubraukiamas, kad granulių viršus lygiuotųsi su indo viršumi. Tada išmatuojama kokia yra masė yra indo su pripiltomis granulėmis atskiromis frakcijomis.

Piltinio tankio reikšmė nustatoma pagal formulę [44]:

$$\rho_p = \frac{m_2 - m_1}{V}; \quad (2.3.2)$$

Čia: m_2 – matavimo indo su biria medžiaga masė, kg;

m_1 – tuščio indo matavimo indo masė, kg;

V – matavimo indo tūris, l.

2.3.4. Vandens įmirkio nustatymas

Vandens įmirkis nustatomas vadovaujantis LST EN 1097-6:2022 [45]. Skirtingų sudėčių granulės sudedamos į atskirus indus pripildytus vandens jas pilnai apsemiant. Drėkinimas atliekamas vieną kartą matuojant bandinių svorį po 24 valandų. Granulės išimamos ir kruopščiai nušluostomos švaria šluoste.

Granulių vandens įgeris skaičiuojamas pagal formulę [44]:

$$W = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100; \quad (2.3.3)$$

Čia: m_1 – įmirkusios medžiagos masė, g;

m – sausos medžiagos masė, g;

2.3.5. Karbonizacija

Dalis užpildų buvo atrinktų kietinti CO₂ pripildytame slėginiame inde. Šio slėginio indo veikimo principas buvo uždaryti užpildus ir sukelti slėgį anglies dioksido pagalba. Anglies dioksidas buvo tiekiamas naudojant „sausą ledą“ dar žinoma kaip sušaldytą anglies dioksidą kuris neturi skystos būsenos.

Šios dujos būdamos kietoje būsenose yra patalpinamos slėginiame inde (žiūr. pav. 20) ir sandariai uždaromos. Tirpdama medžiaga keičia savo būseną į dujinę, taip užimant didesnę tūrį ir sukelti didesnę slėgį inde. Slėginiame inde palaikomas slėgis 0.1 MPa. Karbonizacijos trukmė siekė vieną valandą visiems atrinktiems bandiniams.



20 pav. Slėginis indas naudojamas karbonizacijai

Karbonizuoti bandiniai yra išimami ir pasveriami, palyginama jų masė su pradine mase prieš kietinimo procesą. Turint masę galima paskaičiuoti kiek anglies dioksido dujų sureagavo su medžiagoje esančiu rišikliu, kadangi riškliis yra pagrindinė medžiaga kuri reaguoja karbonizacijos reakcijoje.

Snaudoto CO₂ kiekio apskaičiavimo formulė:

$$m_{CO_2} = \frac{m_k - m_{nk}}{m_r}; \quad (2.3.4)$$

Čia: m_k – karbonizuoto bandinio masė, g;

m_{nk} – nekarbonizuoto bandinio masė, g;

m_r – riškliio masė, g;

Taip pat buvo karbonizuojami bandiniai anglies dioksido kameroje ir palyginami rezultatai su užpildais karbonizuotais slėginiame inde. Šioje kameroje buvo palaikoma 20 % anglies dioksido dujų koncentracija prie 20 °C 3 paras.



21 pav. Anglies dioksido kamera

2.3.6. Titravimas

Titravimas naudojamas kaip papildomas metodas nustatyti kalkių aktyvumą bandiniuose.

Bandymo eiga vyksta sutrinant granules į smulkius miltelius, pasveriamas 1 gramas šių miltelių. Šie milteliai toliau yra supilami į 150 ml distiliuota vandenį ir ištirpinami šiame vandenyje. Į šį tirpalą yra supilama 3 lašai 1% fenolftaleino. Jei yra pasireiškusi karbonizacija fonolftaleino tirpalas sureguos ir indikuos ar bandinio pH reikšmė yra mažesnė už 8.2. Jei yra pH reikšmė bus mažesnė, tai tirpalas nenusidažys, jei pH reikšmė bus didesnė, tai tirpalas taps rožinės spalvos. Toliau iš biuretės (žiūr. pav. 22) yra titruojamas druskos HCl tirpalas kol sureguos visa medžiaga ir tirpalas pataps bespalvis. Pasiekus šią spalvų pokyčio riba pažymimas kiekis kiek ml reikėjo druskos rūgšties. Pagal tai apskaičiuojamas kalcio oksidų kiekis kuris buvo bandinyje [44]:

$$A = \frac{V \cdot T_{CaO}}{m \cdot 10} \cdot 100; \quad (2.3.5)$$

Čia: V – titravimui sunaudotas 0,1N HCl kiekis, ml;

T_{CaO} – Druskos rūgšties 0,1HCl titras, išreikštas CaO kiekiu, g x 100. $T_{CaO} = 2.804$ g/mol;

m – sutrintų granulių masė, g;



22 pav. Biuretė naudojama druskos rūgšties titravimui

2.3.7. Skalumo bandymas

Užpildų skalumo bandymai atliekami vadovaujantis standartu LST EN 13055-1:2004 [46] ir LST 1476.7:1997 [47]. Bandyme yra naudojami sausi užpildai, jie supilami į cilindrą. Cilindras su užpildais yra pastatomas ant vibracinio stalo, vibruojamas tarp 3-60 sekundžių. Baigus vibravimą sulyginamas cilindro su užpildais viršus. Ant cilindro viršaus yra uždedamas stūmoklis su rėmu. Hidrauliniam prese gniuždomoji jėga veikia bandinį tol kol pasiekama 20 mm deformacija, ši

deformacija turi būti pasiekama maždaug per 100 sekundžių. Ardomoji galia nustatoma pagal formulę [44]:

$$C_a = \frac{L+F}{A}; \quad (2.3.6)$$

Čia: C_a – atsparumas trupinimui, N/mm²

L – stūmoklio svorio sukeliama galia, N;

F – ardomoji galia, N;

A – stūmoklio skerspjūvio plotas, mm²



23 pav. Skalumo bandymui naudojamas presas

2.3.8. Betoninių gaminių gamyba

Cilindriniai blokai. Šiame tyrime pagaminti užpildai yra taip pat panaudojami betoninių gaminių gamyboje. Gaminami skirtingi cilindriniai betono gaminiai naudojant giratorių. Vieni bandiniai sudaryti iš įprasto cemento, naudojant dirbtinius cementiniu bei kalkinius užpildus ir dalis smėlio. Taip pat paruošiamas bandinys iš keramzito užpildų tokiu pačiu mišiniu.

7 lentelė. Cilindrų gamybai naudojama masė mišinyje 1 m³ medžiagos išgauti

Nr.	Bandinys	Užpildai	Cementas	Smėlis	Vanduo
1	Malti pelenai + cementas (MPC) cilindras	1097,1	274,3	822,8	411,4
2	Malti pelenai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C) cilindras	1017,6	254,4	763,2	381,6
3	Malti pelenai + cementas + karbonizavimas kameroje (MPC+C) cilindras	1117,4	279,3	838,0	419,0
4	Keramzito užpildų cilindras	755,5	188,9	566,6	283,3

Cemento gaminiams sudaryti yra naudojama 1 dalis cemento, 4 dalys granuliuoto užpildo, 3 dalys smėlio ir 1.5 dalis vandens.



24 pav. Giratorius naudojamas betoninių bandinių gamybai

Vandeniui laidus betonas. Antras bandinys paruošiamas naudojant šlapius, tik pagamintus, užpildus. Šie šlapi užpildai yra pagaminami jau aprašytu granuliavimo būdu ir nepradėjus jiems džiūti yra sudedami į cilindro formos vamzdį, taip sudarant „korėtą“ cilindą kuris yra pralaidus vandeniui.



25 pav. Vandeniui laidaus betono gamyba

3. Rezultatai

3.1. Granuliavimo procesas

Granuliavimas buvo atliekamas granuliavimo disku, kuriame buvo naudojami skirtingos medžiagos norint išgauti skirtingus dirbtinius užpildus tolimesnių bandymų atlikimui.

Dirbtiniai užpildai buvo laikomi po apdirbimo bent 7 dienas, leidžiama jiems pilnai sukietėti ir būti pakankamai tvirtiems tęsti darbus. Praėjus 7 dienoms buvo apžiūrėti šie užpildai vizualiai ar santykis medžiagų buvo atitaikytas tinkamas t.y. ar nesimato aiškaus trupėjimo požymių.

3.2. Dirbtinių užpildų piltinis tankis

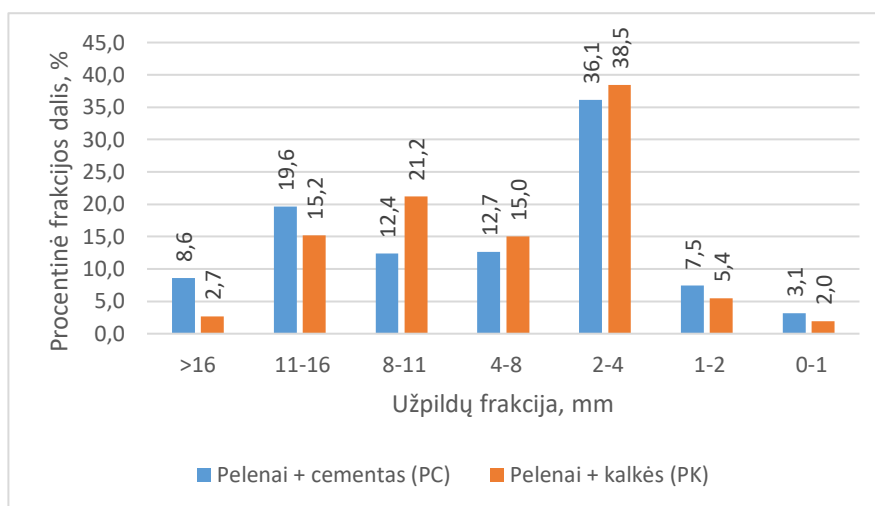
Piltinio tankio bandymo metu buvo nustatomi tūriniai medžiagų tankiai priklausomai nuo frakcijų gautų granuliavimo metu. Šio bandymo tikslas buvo nustatyti kokie yra piltinio tankio rodmenys ir juos užfiksuojant palyginti su kitomis medžiagomis sekanciuose bandymuose.

Kadangi dažniausiai yra matuojamos frakcijos mažesniais rėžiais, tai rezultatuose pateikiami bendri piltiniai tankiai 0-4 mm frakcijoms ir 4-16 mm frakcijoms.

3.2.1. Užpildai su nemaltais pelenais

8 lentelė. Nemaltų pelenų užpildų piltinis tankis

Sudėtis	Granuliometinė sudėtis, mm	Mase, g	Procentinė dalis, %	Bendras piltinis tankis, kg/m ³
Pelenai + cementas (PC)	>16	281,6	8,6	-
	11-16	641,9	19,6	841,3
	8-11	405,0	12,4	
	4-8	414,5	12,7	
	2-4	1182,2	36,1	954,2
	1-2	243,8	7,5	
	0-1	102,6	3,1	
Pelenai + kalkės (PK)	>16	82,9	2,7	-
	11-16	466,9	15,2	730,3
	8-11	650,8	21,2	
	4-8	460,3	15,0	
	2-4	1181,0	38,5	935
	1-2	167,0	5,4	
	0-1	60,0	2,0	



26 pav. Nemaltų pelenų užpildų piltinis tankis

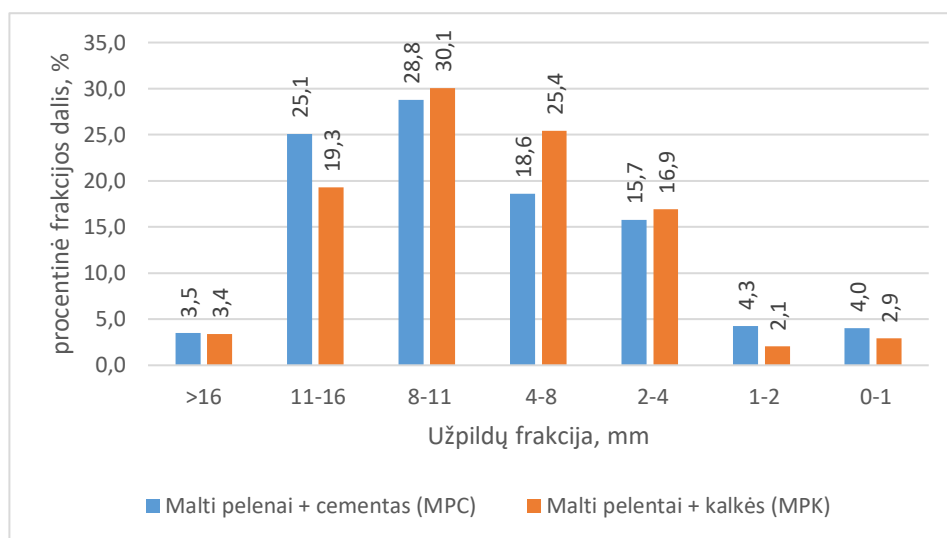
Pagal nemaltų pelenų užpildų piltinį tankį galime matyti, kad didžioji dalis frakcijos pasiskirstydavo 2-4 mm dydžio ruože. Cementiniams užpildams siekė 36,1 %, o kalkiniams užpildams siekė 38,5 %. Mažiausias kiekis dalelių pasiskirstė ties didesnėmis ir mažesnėmis frakcijomis, kiekis neviršijo 8.61%. Pagal šiuose duomenis galima teigti, kad pasirenkant kalkinį ar cementinį rišiklį frakcijų pasiskirstymui neturėjo didelės įtakos.

Bendras piltinis tankis frakcijų ruožams buvo pastebėta, kad 0-4 mm buvo didesnis, nei 4-16 mm. Tai galėtų paaiškinti, kad 4-16 mm frakcijos palieka daugiau tuščių ertmių, o 0-4 mm frakcijos užpildo šias ertmes.

3.2.2. Užpildai su maltais pelenais

9 lentelė. Maltų pelenų užpildų piltinis tankis

Sudėtis	Granuliuotinė sudėtis, mm	Mase, g	Procentinė dalis, %	Bendras piltinis tankis, kg/m ³
Malti pelenai + cementas (MPC)	>16	87,7	3,5	-
	11-16	630,4	25,1	910,3
	8-11	722,7	28,8	
	4-8	467,1	18,6	
	2-4	395,5	15,7	1023,1
	1-2	106,9	4,3	
	0-1	101,5	4,0	
Malti pelentai + kalkės (MPK)	>16	86,2	3,4	-
	11-16	486,9	19,3	849,1
	8-11	759,4	30,1	
	4-8	641,9	25,4	
	2-4	427,0	16,9	925,4
	1-2	52,2	2,1	
	0-1	73,4	2,9	



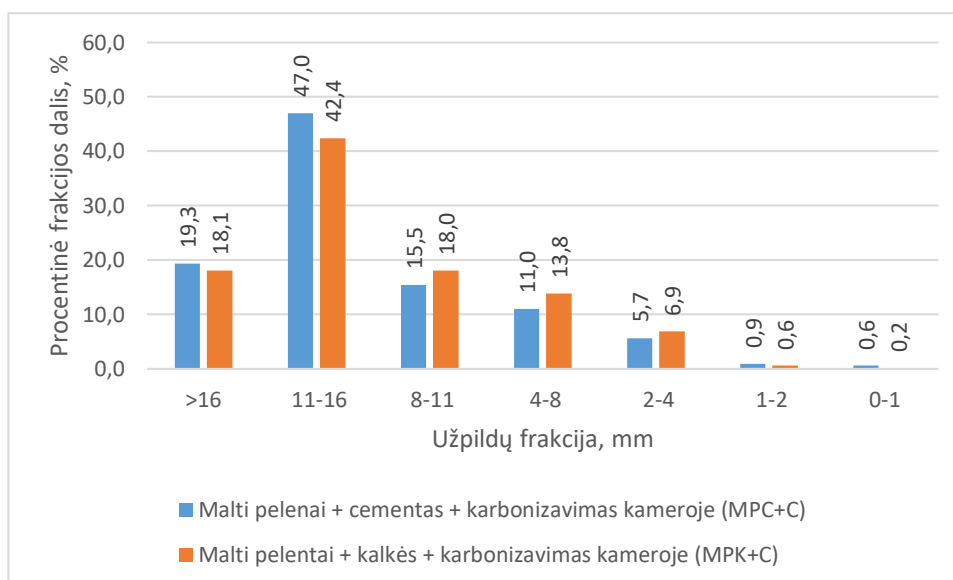
27 pav. Nemaltų pelenų užpildų frakcijų pasiskirstymas

Pagal maltų pelenų užpildų piltinį tankį galime matyti, kad didžioji dalis frakcijos pasiskirstydavo ties viduriu ganėtinai tolygiai, tačiau 8-11 mm dydžio ruože pastebėtas didesnis pasiskirstymas. Cementiniams užpildams 8-11 mm ruože siekė 30,1 %, o kalkiniams užpildams siekė 28,8 %. Mažiausias kiekis dalelių pasiskirstė ties didesnėmis ir mažesnėmis frakcijomis, kiekis neviršijo 4,0 %. Naudojant maltus pelenus buvo pastebėtas 2-16 % procentų tankio prieaugis. Šis prieaugis gali varijuoti dėl nevienodo pasiskirstymo granuliavimo bei matavimo metu.

3.2.3. Karbonizuoti užpildai su maltais pelenais

10 lentelė. Maltų karbonizuotų pelenų užpildų piltinis tankis

Sudėtis	Granulometinė sudėtis, mm	Mase, g	Procentinė dalis, %	Bendras piltinis tankis, kg/m ³
Malti pelenai + cementas + karbonizavimas kameroje (MPC+C)	>16	473,7	19,3	-
	11-16	1152,4	47,0	1100
	8-11	378,6	15,5	
	4-8	268,7	11,0	
	2-4	138,5	5,7	-
	1-2	23,1	0,9	
	0-1	15,3	0,6	
Malti pelentai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C)	>16	699,5	18,1	-
	11-16	1640,1	42,4	915,6
	8-11	697,8	18,0	
	4-8	534,3	13,8	
	2-4	266,7	6,9	-
	1-2	24,6	0,6	
	0-1	6,1	0,2	



28 pav. Maltų karbonizuotų pelenų užpildų frakcijų pasiskirstymas

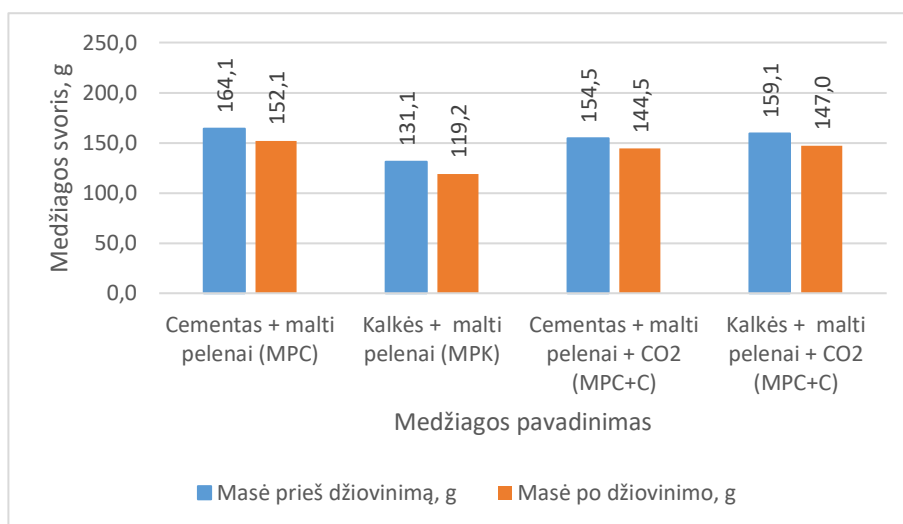
Karbonizuotų maltų dirbtinių pelenų užpildų piltinis tankis padidėjo dėl karbonizacijos. Tai įvyko dėl karbonizacijos proceso sudarant kalcio karbonato junginius, o tai gali reikšti anglies dioksido sugertį. Šiuo atveju užpildai buvo gaminami kitokiu vandens tiekimo būdu, tačiau vandens kiekis išliko toks pat. Vanduo buvo tiekiamas iškart supilant didesnę kiekį vandens, taip susidaro daugiau pradinių didesnių frakcijų užpildų. Dėl šio pokyčio buvo pastebėtas didesnių frakcijų išaugimas, dominavo 11-16 mm frakcijos užpildai. Buvo nustatyta, kad 11-16 mm frakcijų kiekis, nuo viso mišinio masės, sudarė 47,0 % cementiniuose užpilduose ir 42,4 % kalkiniuose užpilduose. Šiuo metodu buvo pastebėta, kad susidarė mažiau smulkios frakcijos užpildų.

Galima teigti, kad granuliavimo disku galima išgauti įvairių frakcijų užpildus naudojant skirtingus vandens tiekimo metodus.

3.3. Užpildų drėgnumas

Vandens drėgnumo testas buvo atliekamas naudojant kaitinimo kamerą kurioje bandiniai buvo palikti džiūti ir išgarinti esamą vandenį. Šiuo metodu buvo norima įsitikinti kiek vandens įsigeria ir išlieka dirbtiniuose užpilduose po granuliavimo.

Medžiaga	Masė prieš džiovinimą, g	Masė po džiovinimo, g	Skirtumas, g	Vandens kiekis, %
Malti pelenai + cementas (MPC)	164,1	152,1	12,0	7,9
Malti pelenai + kalkės (MPK)	131,1	119,2	11,9	10,0
Malti pelenai + cementas + CO ₂ (MPC+C)	154,5	144,5	10,0	7,0
Malti pelenai + kalkės + CO ₂ (MPC+C)	159,1	147,0	12,1	8,2



29 pav. Medžiagos masė prieš ir po džiovinimo

Pagal rezultatuose matomą masės skirtumą galima suprasti, kad prarasta masė buvo susikaupęs vanduo užpilduose. Bandiniuose kurie kietėjo karbonizacijos kameroje buvo pastebėtas mažesnis išsilaikęs vandens kiekis, o bandiniuose kurie kietėjo natūraliai buvo pastebėtas didesnis vandens kiekis. Skirtumas siekė 0,9 % cementiniuose bandiniuose ir 1,8 % kalkiniuose bandiniuose. Taip pat kalkiniai užpildai pasižymėjo didesniu vandens kiekiu: 2,1 % nekarbonizuotiems ir 1,2 % karbonizuotiems užpildams. Skirtumas tarp karbonizuotų ir nekarbonizuotų bandinių drėgnumo kiekyje gali būti paaiškintas dėl reakcijų vykstančių karbonizacijos procese. Kadangi reakcijoje dalyvauja anglies dioksidas, kalcio hidroksidas ir vanduo, tai vanduo galėjo būti sueikvotas procese arba išskirtas kameroje. Taip pat dėl užpildytų porų karbonizacijos metu gali būti drėgmė uždaryta.

3.4. Dirbtinių užpildų tankis

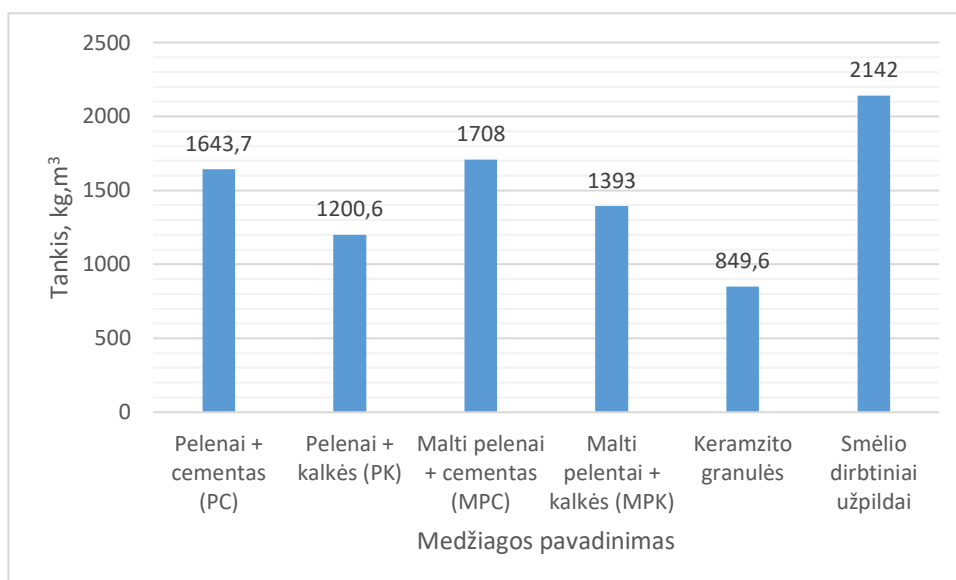
Dirbtinių užpildų tankis buvo matuojamas keliems skirtingiems bandiniams. Bandiniams buvo naudojamas skirtingi rišikliai, cementas ir kalkės, ir skirtingos karbonizavimo sąlygos, kameroje ir slėginiame inde. Taip pat vienuose bandiniuose buvo naudojami mali ir nemali pelėnai kurie gali įtakoti tankį, kadangi smulkesnė jų frakciją palieka mažiau porų nei stambesnės frakcijos pelėnai.

Šiems dirbtiniams pelėnų užpildams ir jų tankiams palyginti buvo išbandyti keramzito užpildai. Keramzito užpildai šiame darbe bus kaip palyginamoji, jau pramonėje naudojama, medžiaga.

3.4.1. Ne karbonizuotų užpildų tankiai

11 lentelė. Ne karbonizuotų užpildų tankis

Medžiaga	Tankis, kg/m ³
Pelėnai + cementas (PC)	1643,7
Pelėnai + kalkės (PK)	1200,6
Mali pelėnai + cementas (MPC)	1708
Mali pelėnai + kalkės (MPK)	1393
Keramzito granulės	849,6
Smėlio dirbtiniai užpildai	2142



30 pav. Nėkarbonizuotų užpildų tankis

Išanalizavus gautus duomenis iš atliktų matavimų galima pastebėti, kad net lengviausi bandiniai t.y. nemalti pelėnai ir kalkės, buvo 41 procentu sunkesni nei keramzito užpildai. Šis rezultatas leidžia suprasti, kad dirbtiniai užpildai iš perdirbtų pelėnų, bei kalkinių ar cementinių rišiklių nėra lengvesni nei keramzito užpildai.

Buvo taip pat išbandyta pagaminti palyginamąjį bandinį pakeičiant pelėnus smėliu. Gauti rezultatai rodo, kad smėlio dirbtiniai užpildai yra tankesni nei kalkiniai ar cementiniai pelėnų užpildai. Cementiniai pelėnų užpildai buvo lengvesni 23 procentais, o kalkiniai užpildai buvo lengvesni 44 procentais.

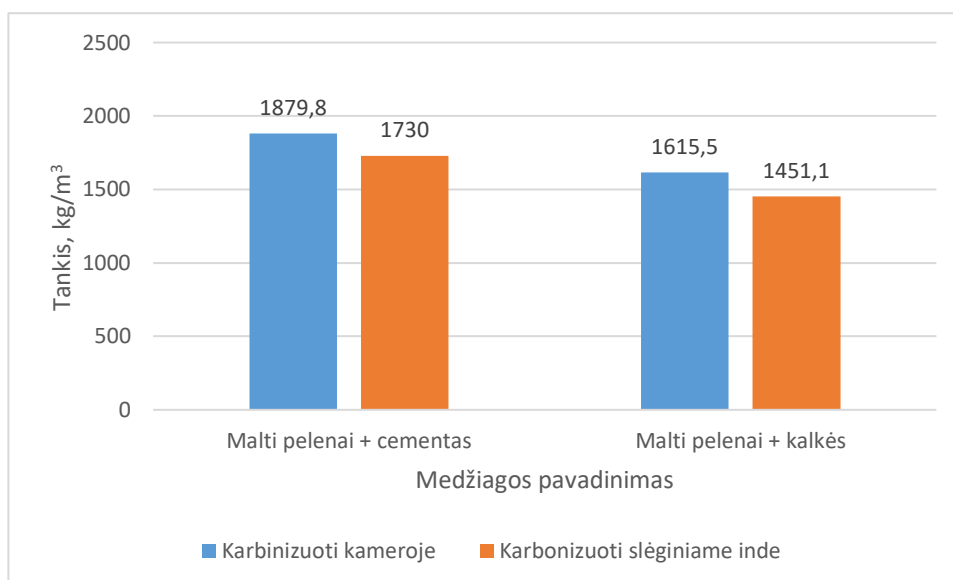
Malti pelėnai šiuo atveju taip pat davė didesnius rezultatus, nei nemalti pelėnai. Cementiniams užpildams tankis pakilo, naudojant maltus pelėnus 2,7 procento. Kalkiniams užpildams tankis pakilo, naudojant maltus pelėnus 23 procentus. Didelis skirtumas tarp cementinių ir kalkinių rišiklių užpildų masės skirtumų, pakeičiant nemaltus pelėnus į maltus, gali būti paaiškintas geresniu pradiniu sukibimu, kadangi smulkesnės ir lengvesnės maltų pelėnų dalelės lengviau aglomeruojasi su kalkiniu riškliu, sukibimas padidėja.

3.4.2. Karbonizuotų užpildų tankiai

Tankis buvo nustatytas užpildų karbonizuotų slėginiame inde ir anglies dioksido kameroje. Tai buvo atlikta norint palyginti karbonizavimosi lygį naudojant skirtingus metodus.

12 lentelė. Karbonizuotų užpildų tankis

Medžiaga	Tankis, kg/m ³
Malti pelėnai + cementas + karbonizavimas kameroje (MPC+C)	1879,8
Malti pelėnai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C)	1615,5
Malti pelėnai + cementas + karbonizavimas inde (MPC+CI)	1730,0
Malti pelėnai + kalkės + karbonizavimas inde (MPK+CI)	1451,1



31 pav. Karbonizuotų užpildų tankis

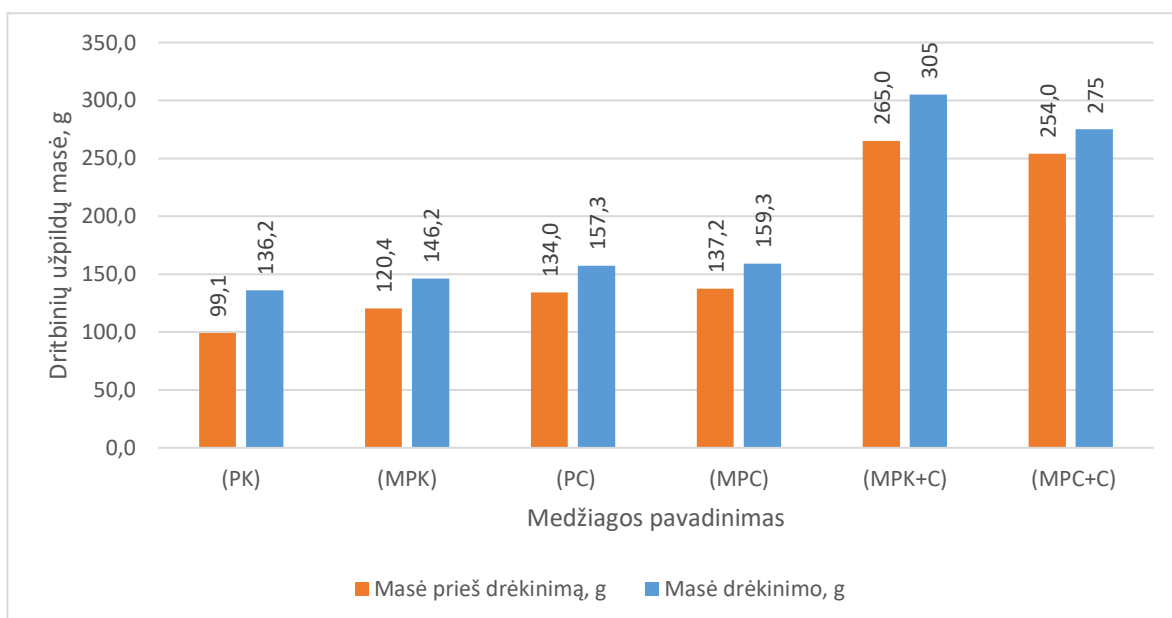
Pagal lentelėse pateiktus rezultatus matosi aiškus tankio skirtumas tarp slėginiame inde ir anglies dioksido kameroje karbonizuotų užpildų. Anglies dioksido kameroje karbonizuoti bandiniai buvo tankesni. Cementiniai užpildai buvo 11 % tankesni po karbonizacijos kameroje, nei bandiniai karbonizuoti slėginiame inde. Kalkiniai bandiniai kietinti kameroje buvo 28 % tankesni. Didesnis tankio prieaugis kalkiniuose gaminiuose indikuoja aktyvesnę karbonizavimosi procesą užpilduose kuriuose yra naudojamas kalkinis rišiklis.

3.5. Dirbtinių užpildų vandens įgeriamumas

Atliekant bandymus buvo nustatytas dirbtinių užpildų vandens įgeriamumas. Bandiniai buvo pasverti ir panardinti į vandenį. Po 24 valandų jie buvo ištraukti ir pasverti dar kartą. Masės prieaugis indikuoja kiek procentaliai vandens gali sugerti šie užpildai.

13 lentelė. Užpildų vandens įgeriamumas

Medžiaga	Masė prieš drėkinimą, g	Masė po drėkinimo, g	Skirtumas, g	Įgėris, %
Pelenai + kalkės (PK)	99,1	136,2	37,1	27,2
Malti pelenai + kalkės (MPK)	120,4	146,2	25,8	17,6
Pelenai + cementas (PC)	134,0	157,3	23,3	14,8
Malti pelenai + cementas (MPC)	137,2	159,3	22,1	13,9
Malti pelenai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C)	265,0	305	40,0	13,1
Malti pelenai + cementas + karbonizavimas kameroje (MPC+C)	254,0	275	21,0	7,6



32 pav. Masės pokytis vertinant vandens įgerį

Gauti rezultatai rodo, kad kalkiniai užpildai yra linkę labiau įgerti vandenį, nei cementiniai. Kalkiniai gaminiai linkę įgerti apie 83 % daugiau vandens, nei cementiniai. Taip pat pastebėta, kad naudojant maltus pelenus vandens įgeriamumas sumažėjo 54 % kalkiniams užpildams ir 7 % cementiniams užpildams. Karbonizacija taip pat sumažino vandens įgeriamumą cementiniams gaminiams 43 %, kalkiniams – 22%.

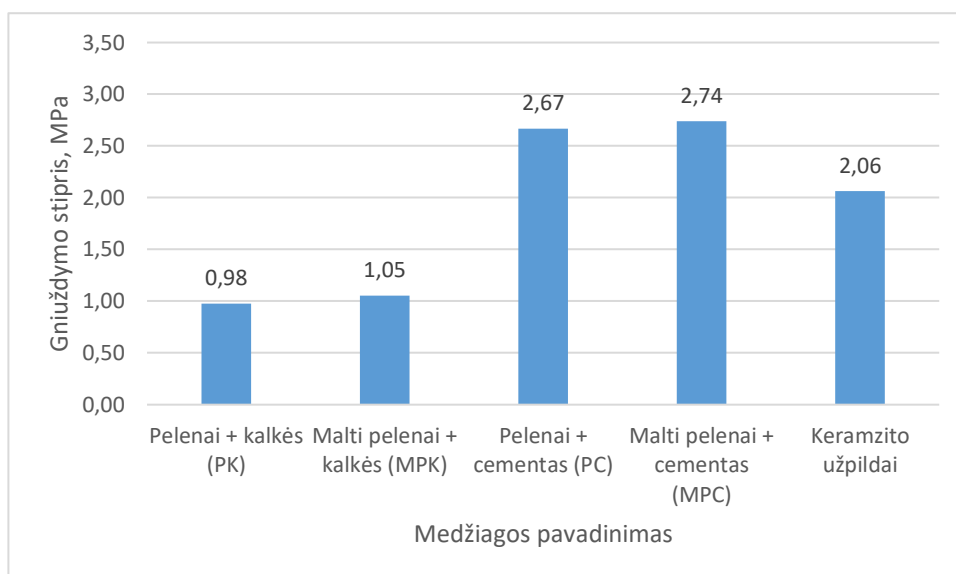
3.6. Dirbtinių užpildų gniuždymo stipris

Užpildų gniuždymo stipris buvo nustatomas norint palyginti jų praktiškumą su keramzito užpildais. Tai buvo atliekama sugniuždant keramzito užpildus su hidrauliniu presu ir lyginant visus dirbtinių užpildų reikšmes, taip įvertinant jų praktiškumą.

3.6.1. Nekarbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris

14 lentelė. Nekarbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris

Medžiaga	Atspratumas gniuždymui, Mpa
Pelenai + kalkės (PK)	0,98
Malti pelenai + kalkės (MPK)	1,05
Pelenai + cementas (PC)	2,67
Malti pelenai + cementas (MPC)	2,74
Keramzito užpildai	2,06



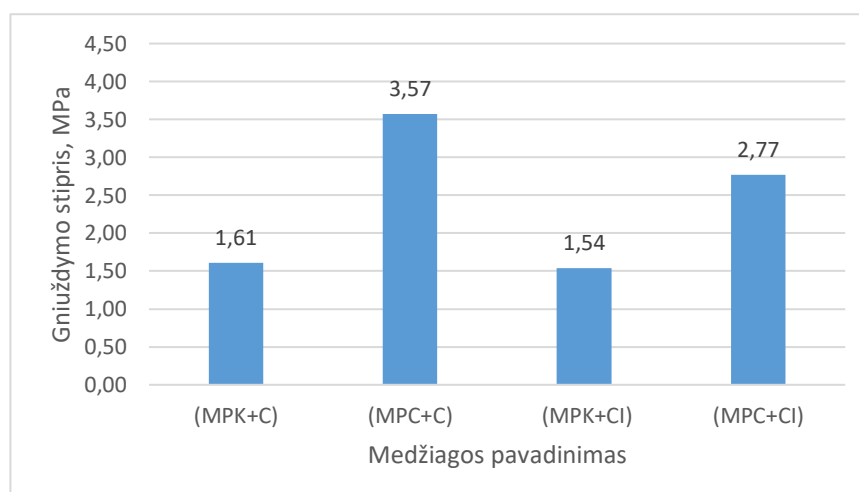
33 pav. Nekarbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris

Gniuždymo bandymo metu buvo nustatyta, kad malti pelėnai davė nežymų gniuždymo stiprio prieaugį. Šis prieaugis buvo 7 % kalkinams užpildams ir 2,6 % cementiniams užpildams. Lyginant su keramzito užpildais dirbtiniai užpildai buvo stipresni tik tie kuriuose buvo naudojamas cementinis rišiklis, stipresni buvo 33 %. Užpildai, kuriuose buvo naudojamas kalkinis rišiklis, buvo 49 % silpnesni nei keramzito užpildai.

3.6.2. Karbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris

15 lentelė. Karbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris

Medžiaga	Atspratumas gniuždymui, Mpa
Malti pelėnai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C)	1,61
Malti pelėnai + cementas + karbonizavimas kameroje (MPC+C)	3,57
Malti pelėnai + kalkės + karbonizavimas inde (MPK+CI)	1,54
Malti pelėnai + cementas + karbonizavimas inde (MPC+CI)	2,77



34 pav. Karbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stipris

Užpildų karbonizavimas priklausomai nuo metodo davė skirtingus rezultatus. Karbonizuojant užpildus slėginiame inde kalkinių užpildų gniuždymo stiprumas išaugo 46 %, o cementinių tik 1 %. Mažas stiprumo prieaugis cementiniuose užpilduose gali reikšti, kad šis metodas nėra pakankamai efektyvus ir patikimas, kadangi kalkinių užpildų stiprumas buvo paveiktas stipriau.

Karbonizavimas anglies dioksido kameroje pasižymėjo geresniais rezultatais. Šiuo atveju stiprumas abiejuose bandiniuose išaugo. Cementinių užpildų gniuždomasis stipris išaugo 30 %, o kalkinių užpildų 53 %. Kalkinių užpildų stiprumas buvo panašus karbonizuojant slėginiame inde ir kameroje, o cementiniai užpildai slėginiame inde karbonizavosi prastai lyginant su kameroje kietinamais užpildais. Šie rezultatai parodo, kad karbonizavimas kameroje yra efektyvesnis ir patikimesnis metodas.

3.7. Betoninių gaminių gamyba naudojant dirbtinius užpildus

Betoniniai cilindrai buvo gaminami su tikslu išbandyti dirbtinius užpildus ir jų efektyvumą betoniniuose gaminiuose, taip pat palyginti juos su keramzitiniais gaminiiais. Betono sudėtis naudojama visuose gaminiuose vienoda, keičiant tik užpildus, išlaikant tą patį tūrį.

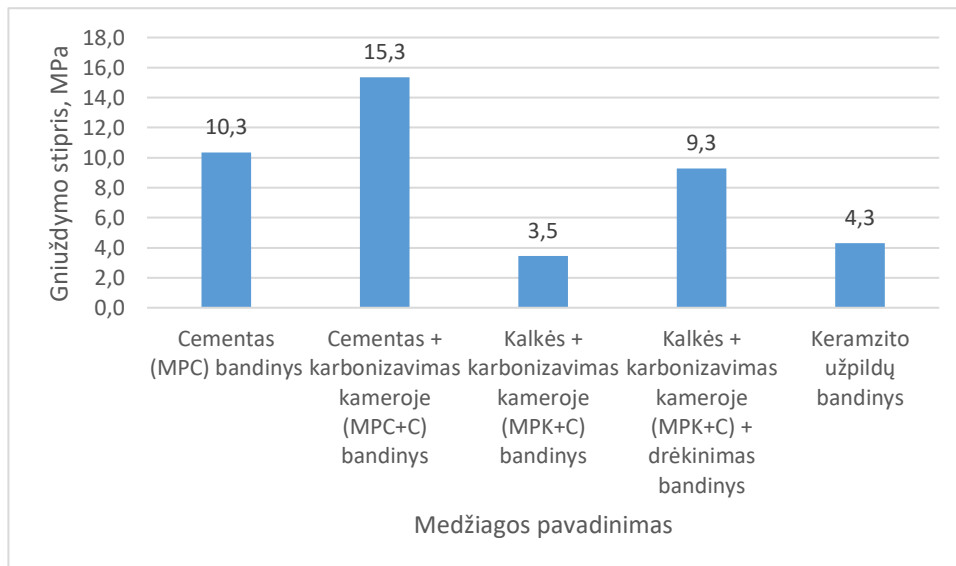
16 lentelė. Betoninių gaminių tankis

Bandinys	Tankis, kg/m ³
Malti pelenai + cementas (MPC) cilindras	1968,7
Malti pelenai + cementas + karbonizavimas kameroje (MPC+C) cilindras	2077,9
Malti pelenai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C) cilindras	1873,8
Malti pelenai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C) + drėkinimas cilindras	1977,0
Keramzito užpildų cilindras	1607,4

Pagal gautus rezultatų reikšmes galima matyti, kad tankiai daug nesiskiria tarpusavyje, kadangi sudėtis yra išlaikoma ta pati, keičiasi tik užpildai.

17 lentelė. Betoninių cilindrinų bandinių gniuždymo stipris

Cilindrinių bandinių užpildai	Gniuždymo galia, Mpa
Malti pelenai + cementas (MPC) cilindrinis bandinys	10,3
Malti pelenai + cementas + karbonizavimas kameroje (MPC+C) cilindrinis bandinys	15,3
Malti pelenai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C) cilindrinis bandinys	3,5
Malti pelenai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C) + drėkinimas cilindrinis bandinys	9,3
Keramzito užpildų cilindras	4,3



35 pav. Betoninių cilindrinų bandinių gniuždymo stipris

Pagal gautus rezultatus stipriausias betoninis cilindras buvo su MPK + C užpildais. Šis cilindras buvo 3,6 karto stipresnis už keramzito betoninį cilindrą. Cilindras, kuriame buvo naudojami nekarbonizuoti MPK užpildai, buvo 50 % silpnesnis nei cilindras su karbonizuotais MPK užpildais.

Cilindrai su kalkiniais užpildais pirmuoju bandymu buvo daromi tuo pačiu principu kaip ir su cementiniais užpildais, tačiau dėl jų savybės įgerti daug vandens buvo pastebėtas prastas mišinio sukibimas. Į šią problemą buvo atsizvelgta papildomai sudrėkinant šiuos užpildus prieš dedant į bendrą mišinį. Gautuose rezultatuose galima matyti, kad cilindras, kuriame nebuvo sudrėkinti kalkiniai užpildai, pasiekė tik 3,5 MPa gniuždymo stiprumą, o sudrėkintas bandinys pasiekė 9,3 MPa. Sudrėkinti kalkiniai užpildai buvo 2,1 karto stipresni nei keramzito užpildų betoninis gaminy.



36 pav. Keramzitinių užpildų bandinio suirimas

Suirus betoniniams bandiniams buvo pastebėta, kad keramzitinuose bandiniuose suirimas įvyko per užpildus. Tai parodo, kad norint išgauti stipresnius bandinius reikia naudoti atsparesnius užpildus.



37 pav. Cementinių užpildų bandinio suirimas

Suirus betoniniams cilindrams buvo galima matyti, kad didžioji dalis užpildų liko nepažeisti, suirimas įvyko aplink užpildus, indikuojant, kad norint pagaminti stipresnius bandinius reikėtų naudoti stipresnį mišinį. Cilindruose kuriuose buvo naudojami kalkiniai užpildai buvo pastebėtas mišrus suirimas, galima buvo pastebėti suirusių ir sveikų užpildų.

3.8. Karbonizacija užpilduose

3.8.1. Karbonizacijos gylis

Karbonizacijos gylis buvo nustatomas naudojant fonolftaleiną. Fenolftaleinas yra užlašinamas ant perskeltų bandinių ir tada galima vizualiai nustatyti iki kokio gylio buvo karbonizuoti bandiniai. Fenolftaleinu buvo tikrinami kameroje karbonizuoti užpildai. Maltų pelenų cementiniai užpildai buvo užfiksuota, kad karbonizavosi vidutiniškai apie 4 mm, o maltų pelenų kalkiniai užpildai vidutiniškai karbonizavosi apie 6 mm nuo paviršiaus. Iš šių rezultatų galima orientuotis, kad užpilduose kuriuose buvo naudojamas kalkinis rišiklis, karbonizacijos procesas yra efektyvesnis.



38 pav. Cementinių užpildų (kairėje) ir kalkinių užpildų (dešinėje) karbonizacijos gylio nustatymas naudojant fenolftaleiną.

3.8.2. Anglies dioksido utilizacija dirbtiniuose užpilduose

Anglies dioksido utilizacija buvo įvertinta masės pokyčiu prieš ir po karbonizacijos. Pagal masės prieaugį galima nustatyti kiek anglies dioksido sureagavo karbonizacijos reakcijoje.

18 lentelė. Masės pokytis karbonizacijos metu

Medžiaga	Masė prieš karbonizaciją, g	Masė po karbonizacijos, g	Masės prieaugis, g	Masės prieaugis, %
Malti pelenai + cementas	1398,00	1415,7	17,7	1,3
Malti pelenai + kalkės	1123,40	1144,2	20,8	1,9

Pagal gautus rezultatus matoma, kad kalkiniai užpildai gali utilizuoti daugiau anglies dioksido nei cementiniai. Kalkiniai užpildai priaugo 3,6 % nuo pradinės masės, o cementiniai 2,7 % nuo pradinės masės. Pagal šiuos duomenis galima nustatyti, kad pagaminus 1 kg kalkinių užpildų galima utilizuoti 18,17 g anglies dioksido.

Titravimo metodas buvo naudojamas įsitikinti kiek anglies dioksido yra sunaudojama karbonizuojant bandinius ir palyginant su masės prieaugiu karbonizacijos metu. Titravimo metodas atliekamas įvertinant kiek lieka laisvų kalcio oksidų, žinant šią masę galima įvertinti pagal molines mases koks kiekis anglies dioksido sureagavo karbonizacijos reakcijoje.

19 lentelė. Titavimo metodu nustatomas anglies dioksido utilizavimo kiekis

Medžiaga	Medžiagos masė, g	HCl kiekis, ml	Laisvųjų kalkių kiekis, %	Bandinio tankis, kg/m ³	CaO bandinyje, g	Kiek išnaudota CaO	Kiek CO ₂ sunaudota
Pelenai + cementas (PC)	1,0	9,9	2,8	1643,7	45,6		
Malti pelenai + cementas + karbonizavimas kameroje (MPC+C)	1,0	5,3	1,5	1879,8	27,9	17,7	13,9
Pelenai + kalkės (PK)	1,0	8,3	2,3	1200,6	27,9		
Malti pelenai + kalkės + karbonizavimas kameroje (MPK+C)	1,0	1,9	0,5	1615,5	8,6	19,3	15,2

Pagal titravimo metodu gautus rezultatus 1 kilogramas kalkinių užpildų gali utilizuoti 9,4 g anglies dioksido. Lyginant su matavimais atliktais įvertinant masės pokytį, titravimo metodas parodė mažesnius rezultatus. Pirmuoju masės matavimo metodu paklaida gali atsirasti dėl susikaupusios drėgmės karbonizavimosi metu. Titravimo metodu yra nustatomas tikslus sunaudotų kalkių oksidų kiekis.

3.9. Vandeniui laidūs betoniniai gaminiai

Pagaminus dirbtinius užpildus jie turi būti tinkamai sandėliuojami, kad tarpusavyje nesukibtų. Šis užpildų sukibimas gali būti panaudojamas formuojant vandeniui laidžius gaminius. Užpildai kurie sukimba tarpusavyje gaunasi korėti, todėl vanduo gali laisvai bėgti pro šį gaminį.



39 pav. Vandeniui laidūs gaminiai ir jų formavimas

Gaminiai yra paliekami formavimo vamzdžiuose, kad būtų galima atlikti bandymus. Vienas litras vandens yra įpilamas per viršutinę formavimo vamzdžio pusę ir matuojamas laikas kol vanduo išbėgs per apatinę vamzdžio dalį. Šie matavimai atliekami trijų skirtingų frakcijų bandiniams.

20 lentelė. vandens laidumas korėtų betoninių gaminių.

Bandinyje naudotos frakcijos	Bandinio skersmuo, cm	Laidumas vandeniui, l/s	Laidumas vandeniui 1m ² , l/s
> 16 mm	10,5	0,24	28,3
< 16 mm	10,5	0,16	18,9
Maišyta frakcija	10,5	0,28	32,1

Pagal gautus rezultatus matoma, kad laidžiausia betonui frakcija buvo maišyta, kuri praleidžia 32,1 litrą per sekundę viename kvadratiname metre. Mažiausias laidumas buvo bandinio kurio užpildų frakcija buvo virš 16 mm, 18,9 litrai per sekundę. Taip pat, nors ir gniuždymo bandymai buvo neatlikti dėl ganėtinai silpnai sukibusios struktūros, didžiausiu stiprumu pasižymėjo > 16 mm frakcijos bandiniai. Norint, kad šie gaminiai būtų naudojami statybų srityje kaip pėsčiųjų takų danga, reikia naudoti papildomas jungiamąsias priemones formavimo metu.

3.10. Pelenų XRD analizė

XRD analizė buvo atlikta pelenams su tikslu išsiaiškinti kokia yra jų cheminė sudėtis ir ar patys pelenai dalyvauja karbonizacijos procese.

21 lentelė. Pelenų cheminių elementų sudėtis

Cheminis elementas	Si	Ca	Fe	Al	Na	Mg	S
%	17,7	15,5	5,1	3,72	1,53	1,52	1,46
Cheminis elementas	K	Cl	P	Ti	Zn	Ba	Cu
%	1,3	1,08	0,839	0,767	0,627	0,208	0,19
Cheminis elementas	Mn	Pb	Cr	Sr	Zr	Ni	Rb
%	0,099	0,075	0,0521	0,0444	0,0154	0,0142	2,862PPM
Cheminis elementas	Nb	SUMA					
%	16,913 PPM	51,8					

22 lentelė. Pelenų metalų oksidų sudėtis

Metalų oksidai	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O
KCps	7,1	538,3	632,5	62	63,8	28,7	8,8
%	37,9	21,7	7,3	7,03	3,64	2,52	2,06
Metalų oksidai	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	Cl	ZnO	CuO	BaO
KCps	20,3	44,9	24,6	28,1	181,5	43,8	2
%	1,92	1,56	1,28	1,08	0,781	0,238	0,232
Metalų oksidai	MnO	PbO	Cr ₂ O ₃	SrO	ZrO	NiO	Rb ₂ O
KCps	9	14,7	3,2	36,6	23,3	2,6	2,4
%	0,128	0,0808	0,0762	0,0525	0,0208	0,0181	32,656 PPM
Metalų oksidai	Nb ₂ O ₅	SUMA:					
KCps	1,7						
%	24,194 PPM	89,5					

Pagal metalų oksidų pasiskirstymą galima matyti, kad Kauno kogeneracinės elektrinės pelenai pagrinde susideda iš silicio dioksido 37,9 % ir kalcio oksidų 21,7 %. Taip pat turi 7,3 % geležies oksidų ir 7,03 % aliuminio oksidų.

3.11. Užpildų ekonominis palyginimas

Atlikus užpildų bandymus ir nustatius savybes kalkinių, cementinių ir keramzitinių užpildų buvo pastebėta nemažai skirtumų tarp jų tankio, gniuždymo stiprio, įgeriamumo. Kai kurie šie skirtumai buvo pakankamai dideli, kad būtų galima lyginti šiuo užpildus. Tam buvo pasirinkta atlikti ekonominį šių užpildų palyginimą norint įvertinti jų praktiškumą. Dėl įvairių sudėtingų procesų vykstančių šių produktų gamybos metu yra įvertinama tik medžiagų kaina.

Dirbtinių užpildų, kuriuose yra naudojami pelenai, kaina buvo skaičiuojama pagal rišiklių kainą norint pagaminti 1 m³ medžiagos. Pelenų kaina nėra skaičiuojama, kadangi ši medžiaga dažnai yra vertinama kaip atlieka, kurią, jei niekas neutilizuoja, atsiduria savartyne. Gamybos proceso kainą yra sudėtinga įvertinti todėl ji nėra priimama galutinėje sumoje. Taip pat lyginant su keramzito užpildų gamyba, pelenų užpildams pagaminti nereikia sudėtingų procesų.

Vieno kg cemento kaina norint pagaminti 1 m³ dirbtinių užpildų yra 25,22 Eur [48].

Keramzito užpildų kaina 1 m³ yra įvertinama pagal jau pagamintus gaminius ir jų kainą rinkoje. Jų kaina siekia 133,6 Eur už 1 m³ [49].

Užpildų kaina, kuriuose naudojamos gamtinės hidraulinės kalkės, taip pat yra vertinami pagal rišiklio kiekį. Jų kaina siekia 102,4 Eur už 1 m³ [39].

Pagal šias kainas galima matyti, kad cementiniai užpildai vertinant tik medžiagas yra 5,29 karto pigesni nei keramzitiniai užpildai ir 4,06 karto pigesni už kalkinius užpildus. Šis kainų palyginimas yra orientacinis ir norint gauti tikrą kainą reikia įvertinti gamybos, logistikos ir kitus procesus įtakančius gaminio kainą.

Išvados

1. Granuliavimo technologijos būdu buvo pagaminti įvairios granulometrijos dirbtiniai užpildai, kurių sudėtyje buvo naudojami malti ir nemalti kogeneraciniai pelenai, bei kalkių arba cemento rišikliai. Gautų lengviausių kalkinių užpildų dalelių tankis buvo 1201 kg/m³, o cementinių – 1644 kg/m³ (palyginimui nustatytas keramzito užpildų dalelių tankis buvo 850 kg/m³).
2. Rezultatai parodė, kad nekarbonizuotų dirbtinių užpildų gniuždymo stiprumas pagal LST 1476.7:1997 buvo pasiektas 1,08 MPa (naudojant kalkinį rišiklį) ir 2,74 MPa (naudojant cementinį rišiklį).
3. Karbonizavimas anglies dioksido kameroje davė geresnius rezultatus, nei karbonizavimas slėginiame inde. Dirbtinių užpildų karbonizacija kameroje pagerino gniuždymo stiprumą 30 % procentų cementiniams užpildams ir 53 % kalkiniams užpildams. Slėginiame inde cementinių užpildų stiprumas nepadidėjo, o kalkinių gaminių padidėjo 46 %.
4. Buvo pagaminti cilindriniai betoniniai bandiniai su skirtingais užpildais. Gniuždant cilindro formos betono bandinius, kuriuose buvo naudojami cementiniai karbonizuoti užpildai, buvo gautas 15,3 MPa gniuždymo stipris, o su karbonizuotais kalkiniais užpildais – 9,3 MPa. Su abiem rišikliais ir dirbtiniais užpildais betono gaminiai buvo gauti didesnio gniuždymo stiprio, nei naudojant keramzito užpildus. Bandiniai su kalkiniais užpildais buvo 2,2 karto stipresni už keramzito, o bandiniai su cementiniais užpildais stipresni 3,6 karto.
5. Dirbtiniai užpildai su kalkių rišiklių CO₂ dujų aplinkoje karbonizavosi gerokai aktyviau, nei su cementiniu rišikliu. Titravimo metodu nustatyta, kad 1 kilogramas kalkinių dirbtinių užpildų su kogeneraciniais pelenais kameroje absorbuoja 9,4 gramo anglies dioksido, o cementiniai – 7,4 gramo.

Literatūros sąrašas

1. V. Mymrin, D.E. Pedroso, C. Pedroso, K. Alekseev, M.A. Avanci, E. Winter Jr., L. Cechin, P.H. B. Rolim, A. Iarozinski, R.E. Catai. Environmentally clean composites with hazardous aluminum anodizing sludge, concrete waste, and lime production waste. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. Elsevier, 2017 [žiūrėta 2022-03-11]. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.299>.
2. D.M. Ren, C.J. Yan, P. Duan, Z.H. Zhang, L.Y. Li, Z.Y. Yan. Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2016 [žiūrėta 2022-03-11]. ISSN 0950-061. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.103>.
3. J. Hussain, A. Khan, K. Zhou. The impact of natural resource depletion on energy use and CO2 emission in Belt & Road Initiative countries: A cross-country analysis. *Energy* [interaktyvus]. Elsevier, 2020 [žiūrėta 2022-03-11]. ISSN 0360-5442. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117409>.
4. Louise K. Turner, Frank G. Collins. Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2013 [žiūrėta 2022-03-11]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>.
5. Craig Heidrich, Hans-Joachim Feuerborn, Anne Weir. Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Perspective for global CCP utilisation* [interaktyvus]. VGB PowerTech, 2013 [žiūrėta 2022-03-11]. Prieiga per: <https://www.gypsum.org/wp-content/uploads/2014/06/VGBPowerTech2013-12pp46-52HEIDRICHAutorenexemplar.pdf>.
6. Yasmin Hefni, Yehia Abd El Zaher, Mona Abdel Wahab. Influence of activation of fly ash on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2018 [žiūrėta 2022-03-11]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.021>.
7. Ashish Kumer Saha. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research* [interaktyvus]. CIEnvE, 2017 [žiūrėta 2022-03-11]. ISSN 2468-2039. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>.
8. Patricia Kara De Maeijer, Bart Craeye, Ruben Snellings, Hadi Kazemi-Kamyab, Michel Loots, Koen Janssens, Gert Nuyts. Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2020 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120493>.
9. Vivian WY. Tam, Anthony Butera, Khoa N. Le. Mechanical properties of CO2 concrete utilising practical carbonation variables. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. Elsevier, 2021 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126307>.
10. Caijun Shi, Yake Li, Jiake Zhang, Wengui Li, Linlin Chong, Zhaobin Xie. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. Elsevier, 2015 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>.

11. Halit Yazıcı, Engin Deniz, Bülent Baradan. The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2013 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.003>.
12. Tiefeng Chen, Xiaojian Gao, Miao Ren. Effects of autoclave curing and fly ash on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2017 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.074>.
13. Kou Shi-Cong, Zhan Bao-jian, Poon Chi-Sun. Use of a CO2 curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cement & Concrete Composites* [interaktyvus]. Elsevier, 2013 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0958-9465. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.008>.
14. Anuar Ulykbanov, Eldar Sharafutdinov, Chul-Woo Chung, Dichuan Zhang, Chang-Seon Shon. Performance-based model to predict thermal conductivity of non-autoclaved aerated concrete through linearization approach. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2018 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.147>.
15. Yanqing Xia, Yun Yan, Zhihua Hu. Utilization of circulating fluidized bed fly ash in preparing non-autoclaved aerated concrete production. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2013 [žiūrėta 2022-03-18]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.033>.
16. Sormeh Kashef-Haghighi and Subhasis Ghoshal. CO2 Sequestration in Concrete through Accelerated Carbonation Curing in a Flow-through Reactor. *Department of Civil Engineering, McGill University, Montreal, QC, Canada* [interaktyvus]. Ind. Eng. Chem. Res. 2010, 49, 3, 1143–1149, 2010 [žiūrėta 2022-03-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/ie900703d>.
17. Alia Ben Ghacham, Louis-Cesar Pasquier, Emmanuelle Cecchi, Jean-François Blais, Guy Mercier. Valorization of waste concrete through CO2 mineral carbonation: Optimizing parameters and improving reactivity using concrete separation. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. Elsevier, 2017 [žiūrėta 2022-03-18]. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.015>.
18. Bao Jian Zhan, Dong Xing Xuan, Chi Sun Poon. Enhancement of recycled aggregate properties by accelerated CO2 curing coupled with limewater soaking process. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. Elsevier, 2018 [žiūrėta 2022-03-25]. ISSN 0958-9465. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.011>.
19. Yazı Meng, Tung-Chai Ling, Kim Hung Mo, Weihao Tian. Enhancement of high temperature performance of cement blocks via CO2 curing. *Science of the Total Environment* [interaktyvus]. Elsevier, 2019 [žiūrėta 2022-03-25]. ISSN 0048-9697. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.411>.
20. Zhan Baojian, Poon Chisun, Shi Caijun. CO2 curing for improving the properties of concrete blocks containing recycled aggregates. *Cement & Concrete Composites* [interaktyvus]. Elsevier, 2013 [žiūrėta 2022-03-25]. ISSN 0958-9465. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.013>.
21. Arpita Bhatta, Sharon Priyadarshinai, Aiswarya Acharath Mohanakrishnana, Arash Abria, Melanie Sattlera, Sorakrich Techapaphawitc. Physical, chemical, and geotechnical properties of

- coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials* [interaktyvu]. Elsevier, 2019 [žiūrėta 2022-03-27]. ISSN 2214-5095. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00263>.
22. Erin R. Bobicki, Qingxia Liu, Zhenghe Xu, Hongbo Zeng. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Progress in Energy and Combustion Science* [interaktyvus]. Elsevier, 2011 [žiūrėta 2022-03-29]. ISSN 0360-1285. Prieiga per: doi:10.1016/j.peccs.2011.11.002.
 23. Bao Jian, Zhana Dong, Xing Xuana, Chi Sun, Poona Cai, Jun Shib. Mechanism for rapid hardening of cement pastes under coupled CO₂-water curing regime. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. Elsevier, 2018 [žiūrėta 2022-04-03]. ISSN 0958-9465. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.021>.
 24. Bao Lu, Pingping He, Jianhui Liu, Ziyi Peng, Baixing Song, Xiang Hu, Microstructure of Portland cement paste subjected to different CO₂ concentrations and further water curing. *Journal of CO₂ Utilization* [interaktyvus]. Elsevier, 2021 [žiūrėta 2022-04-03]. ISSN 2212-9820. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101714>.
 25. Xiaoliang Fang, Dongxing Xuan, Chi Sun Poon. Empirical modelling of CO₂ uptake by recycled concrete aggregates under accelerated carbonation conditions. *Materials and Structures* [interaktyvus]. CrossMark, 2017 [žiūrėta 2022-04-03]. Prieiga per: DOI 10.1617/s11527-017-1066-y.
 26. Y. Lo, H.M. Lee. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. *Building and Environment* [interaktyvus]. Pergamon, 37 (2002) 507–514 [žiūrėta 2022-04-03]. ISSN 0360-1323. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230100052X>.
 27. Xiangping Xian, Duo Zhang, Han Lin, Yixin Shao. Ambient pressure carbonation curing of reinforced concrete for CO₂ utilization and corrosion resistance. *Journal of CO₂ Utilization* [interaktyvus]. Elsevier, 2022 [žiūrėta 2022-04-12]. ISSN 2212-9820. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101861>.
 28. Baojian Zhan, Chi Sun Poon, Qiong Liu, Shicong Kou, Caijun Shi. Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2013 [žiūrėta 2022-04-12]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.008>.
 29. Bao Jian Zhan, Dong Xing Xuan, Chi Sun Poon, Cai Jun Shi. Effect of curing parameters on CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvu]. Elsevier, 2016 [žiūrėta 2022-04-12]. ISSN 0958-9465. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.002>.
 30. Chaofeng Liang, Bihao Pan, Zhiming Ma, Zhihai He, Zhenhua Duan. Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. Elsevier, 2020 [žiūrėta 2022-04-12]. ISSN 0958-9465. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446>.
 31. Shi-Cong Kou, Chi-Sun Poon. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement & Concrete Composites* [interaktyvus]. Elsevier, 2012 [žiūrėta 2022-04-12]. ISSN 0958-9465. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011>.
 32. Alessandro Mazzella, Massimiliano Errico, Daniela Spiga. CO₂ uptake capacity of coal fly ash: Influence of pressure and temperature on direct gas-solid carbonation. *Journal of Environmental*

- Chemical Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2016 [žiūrėta 2022-04-14]. ISSN 2213-3437. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.020>.
33. A.P. Fantilli, O.Mancinelli, B.Chiaia. The carbon footprint of normal and high-strength concrete used in low-rise and high-rise buildings. *Case Studies in Construction Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2019 [žiūrėta 2022-04-12]. ISSN 2214-5095. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00296>.
 34. Gökhan Baykal, Ata Gürhan Döven. Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results. *Resources, Conservation and Recycling* [interaktyvus] Elsevier, Volume 30, Issue 1, July 2000, Pages 59-77 [žiūrėta 2022-05-19]. ISSN 0921-3449. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344900000422>.
 35. D T Bach, V L Hoang, N B Nguyen. Pelletized fly ash aggregates use for making eco-friendly concrete. *Materials Science and Engineering* [interaktyvus] IOP Publishing Ltd, 2020 [žiūrėta 2022-10-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/3/032028>.
 36. Francesco Colangelo, Francesco Messina, Raffaele Cioffi. Recycling of MSWI fly ash by means of cementitious double step cold bonding pelletization: Technological assessment for the production of lightweight artificial aggregates. *Journal of Hazardous Materials* [interaktyvus] Elsevier, Volume 299, 2015, Pages 181-191 [žiūrėta 2022-10-18]. ISSN 0304-3894. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.018>.
 37. BAURESTA: Švediškų Cementas Rocket Cement M-600. © 2022 - Bauresta [žiūrėta 2022-10-18] Prieiga per: <https://bauresta.lt/remontiniai-misiniai/696-svediskas-cementas-rocket-cement-m-600.html>.
 38. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 197-1:2011] Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2012.
 39. HELM: GAMTINĖS HIDRAULINĖS KALKĖS NHL 3,5. © 2022 – Helm [žiūrėta 2022-10-18] Prieiga per: <https://www.helm.lt/lt/priedai-betonui-risanciosios-medziagos/gamtines-hidraulines-kalkes-nhl-3-5>.
 40. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 459-1:2010] Statybinės kalkės. D. 1, Apibrėžtys, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
 41. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 932-1:2001] Užpildų pagrindinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Ėminio ėmimo metodai. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2001.
 42. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13055:2016] Lengvieji užpildai. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2018.
 43. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1097-5:2008] Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 5 dalis. Vandens kiekio nustatymas džiovinant ventiliuojamoje krosnyje. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2008.
 44. Ernestas IVANAUSKAS, Algirdas AUGONIS, Ramūnas GEČYS, Vitoldas VAITKEVIČIUS. *Statybinių medžiagų laboratoriniai darbai*. Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla. 144 p. ISBN 978-9955-20-707-8.
 45. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1097-6:2022] Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 6 dalis. Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2022.

46. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13055-1:2004] lengvieji betono, skiedinio ir injekcinio skiedinio užpildai. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 2022.
47. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST 1476.7:1997. Betono ir skiedinio užpildai : bandymo metodai : stiprumo nustatymas. Vilnius : Lietuvos standartizacijos departamentas, 1997.
48. Lytagra: Švediškasis ROCKET CEMENT M-600 CEM I 42.5R 35KG. © 2023 - Lytagra [žiūrėta 2023-01-01] Prieiga per: <https://lytagra.lt/statybines-medziagos-apdaila/birios-statybines-medziagos/cementas/rocket-cement-m-600-cem-i-42-5r-35kg-40>.
49. LEMORA: keramzitas. ©2023 – Lemora [žiūrėta 2023-01-01] Prieiga per: <https://lemora.lt/izoliacija-sandarinimas/silumos-garso-izoliacija/keramzitas/32-fibo-keramzitas1>.

Priedai

1 priedas. Dalyvavimo „SMART BUILT ENVIRONMENT“ sertifikatas

