



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Savaime atsinaujinančio betono su kristalizaciniais ir šlako
priedais ilgaamžiškumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Darius Mlečka

Projekto autorius

Doc. Dr. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Savaime atsinaujinančio betono su kristalizaciniais ir šlako priedais ilgaamžiškumo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Darius Mlečka

Projekto autorius

Doc. Dr. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

Prof. Dr. Vitoldas Vaitkevičius

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Darius Mlečka

Savaime atsinaujinančio betono su kristalizaciniais ir šlako priedais ilgaamžiškumo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Dariaus Mlečkos, baigiamasis projektas tema „Savaime atsinaujinančio betono su kristalizaciniais ir šlako priedais ilgaamžiškumo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Darius Mlečka. Savaimė atsinaujinančio betono su kristalizaciniais ir šlako priedais ilgaamžiškumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas vadovas doc. Dr. Ernestas Ivanauskas; Kauno technologijos universitetas, statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05)

Reikšminiai žodžiai: kristalinis priedas, dolomitas, kalcio karbonatas

Kaunas, 2020. 49 p.

Santrauka

Šiame darbe yra tiriamas savaimė atsinaujinančio betono su kristaliniais ir šlako priedais ilgaamžiškumas. Kad tai ištirti buvo atlikti betono bandinių gniuždomojo, lenkiamojo stiprio nustatymai. Taip pat buvo išmatuotos betono bandinių deformacijos jam kietėjant. Ištirtas vandens prasiskverbimas per betoną veikiant slėgiui bei išmatuotas ir apskaičiuotas bandinių poringumas, atsparumas šalčiui, ciklais. Buvo atlikti chlorido jonų prasiskverbimo bandymai ir apskaičiuotas chlorido jonų prasiskverbimo koeficientas. Atliktas tyrimas nustatant vandens kapiliarinę įgertį pro plyšį prieš ir po jam užsitaisius bandiniuose su šlako priedu.

Atlikus bandymus, bandiniai po 3 mėnesių, kuriuose buvo 10% cemento keičiama dolomitu ir naudojamas kristalinis priedas Betocrete CT360-WP įgijo 10,26% mažesnę stiprį lyginant su kontroliniais bandiniais. Išmatavus santykinę bandinių deformacijas po 28 parų nustatyta, kad tarp kontrolinių bandinių ir bandinių su priedais yra labai mažas skirtumas - tik 0,002%. Vandens prasiskverbimo bandymai veikiant 1,2 MPa slėgiui parodė, kad visi bandiniai yra nelaidūs vandeniui, tačiau lyginant kontrolinius bandinius, betonas su kristaliniu priedu buvo 33% mažiau laidus vandeniui. Chlorido jonų prasiskverbimo bandymu nustatyta, kad bandiniai su kristaliniu priedu be jokių kitų papildomų priemonių įgijo mažiausią chlorido jonų prasiskverbimo koeficientą, 33,23% mažesnę lyginant su kontroliniais bandiniais, kas parodo, kad toks betonas yra ilgaamžiškesnis. Betono šalčio atsparumo prognozavimo metodika buvo nustatyta, kad betonas su kristaliniu priedu ir 10% cemento pakeistu dolomito milteliais pasižymėjo 44% geresniu atsparumu šalčiui, ciklais.

Apibendrinant visus gautus rezultatus galima teigti, jog kristalinio priedo bei dolomito naudojimas padaro betoną ilgaamžiškesniu. Tokio betono panaudojimas galėtų būti ypač naudingas gaminant pastatų pamatus, tiltus, hidrotechninius statinius.

Darius Mlečka. Investigations of Durability of Self-healing Concrete with Crystallization and Slag Additives. Master's Final Degree Project supervisor doc. Dr. Ernestas Ivanauskas; Kaunas University of Technology. Civil engineering and architecture faculty.

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

Keywords: crystalline admixtures, dolomite, calcium carbonate

Kaunas, 2020. 49 p.

Summary

In this work is studied durability properties of self healing concrete with crystalline and slag additives. To investigate this, the compressive and bending strength of the specimens was determined. The deformations during concrete hardening was measured also. The penetration of water through concrete under pressure was studied and the resistance of freeze-thaw cycles, porosity was calculated. Chloride ions penetration tests also were done and the chloride ions penetration coefficient was determined.

After testing, specimen after 3 months containing 10% cement exchanged dolomite and having crystalline additives Betocrete CT360-WP have had 10,26% less compressive strength comparing with reference specimens. Deformation calculations showed that specimens after 28 days have insignificant difference only in 0,002%. Water permeability test with 1,2 MPa pressure showed that all specimens were water resistance, but specimen with crystalline additives have been 33% more water resistant comparing with reference specimens. Chloride ion penetration test showed that samples with crystalline additive had the lowest chloride ion permeability coefficient, 33,23% lower compared to reference samples, which shows that this concrete is more durable. Concrete frost resistance prediction methodology showed that concrete with crystalline additive and 10% cement exchanged dolomite had 44% better frost resistance in cycles.

Summarizing all the result, it can be claimed that the use of crystalline additive and dolomite makes concrete more durable. The use of such concrete could be particularly useful in the production of building foundations, bridges, hydrotechnical structures.

Turinys



.....	1
Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas	11
1. Literatūros apžvalga	12
1.1. Betono įtrūkimų savaiminis atsinaujinimas paremtas bakterijų sudaromomis nuosėdomis	12
1.2. Betono plyšių savaiminis atsinaujinimas, paremtas mineralinėmis medžiagomis	14
2. Tyrimų metodologija	25
2.1. Betono prizmelių su dolomitu gniuždomojo stiprumo ir deformacijų nustatymas	25
2.2. Betono prizmelių su dolomitu ir kristaliniu priedu gniuždomojo stiprumo ir deformacijų nustatymas	26
2.3. Betono kubelių su dolomitu ir kristaliniu priedu gniuždomojo stiprumo nustatymas	27
2.4. Vandens įsiskverbimo gylio veikiant slėgiui bandymas	27
2.5. Chlorido jonų prasiskverbimo bandymas	29
2.6. Vandens įgerties ir atsparumo šalčiui pagal poringumą nustatymas betone	30
2.7. Vandens kapiliarinės įgerties matavimas per plyšį prieš ir po jo užsitaisymo betone su šlako priedu	31
3. Rezultatai ir diskusija	34
3.1. Pirmas tyrimas. Gniuždomojo ir lenkiamojo stiprumo ir santykinų deformacijų nustatymas kai mišinyje naudojamas dolomitas.....	34
3.2. Antras tyrimas. Gniuždomojo ir lenkiamojo stiprumo ir santykinų deformacijų nustatymas kai mišinyje naudojamas dolomitas ir kristalinis priedas Betocrete CP-360 WP.	36
3.3. Trečias tyrimas. Betono su kristaliniais priedais stiprumo nustatymas po 3, 7, 28, 90 parų....	38
3.4. Ketvirtas tyrimas. Vandens įsiskverbimo gylio nustatymas veikiant slėgiui	39
3.5. Penktas tyrimas. Chlorido jonų prasiskverbimo bandymas	40
3.6. Šeštas tyrimas. Betono atsparumo šalčiui prognozavimas	41
3.7. Vandens kapiliarinės įgerties matavimo per plyšį prieš ir po jo užsitaisymo betone su šlako priedu rezultatai	42
Išvados	43
Literatūros sąrašas	44
Priedai	46
1 lent. Pirmojo bandimo deformacijų skaičiavimo rezultatai	46
2 lent. Pirmojo bandimo gniuždimo jėgos matavimo rezultatai	46
3 lent. Antrojo bandimo deformacijų skaičiavimo rezultatai	46
4 lent. Antrojo bandimo gniuždimo jėgos matavimo rezultatai	46
5 lent. Trečiojo bandimo gniuždimo jėgos matavimo rezultatai	47
6 lent. Šeštojo įgerties nustatymo badimo rezultatai	47
7 lent. Kapiliarinės įgerties pro plyšį bandimo rezultatai	48
8 lent. Kapiliarinės įgerties pro plyšį bandimo rezultatai	48

9 lent. Kapiliarinės įgerties pro plyšį bandimo rezultatai.....	49
10 lent. Kapiliarinės įgerties pro plyšį bandimo rezultatai.....	49

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Mišinių sudėtys.....	15
2 lentelė. Skiedinio ir betono stiprumo nustatymo rezultatai.....	17
3 lentelė. Gniuždomasis bandinių stipris.	24
4 lentelė. Bandinių sudėtys	25
5 lentelė. Medžiagų kiekiai bandiniuose.....	26
6 lentelė. Bandinių mišinių sudėtys.	27
7 lentelė. Bandinių sudėtys.	31
8 lentelė. Šlako cheminė sudėtis.	32
9 lentelė. Bandinių deformacijos.....	34
10 lentelė. Atsparumo lenkimui rezultatai.	35
11 lentelė. Gniuždimo jėgos atsparis.	35
12 lentelė. Bandinių deformacijos.....	36
13 lentelė. Atsparumo lenkimui rezultatai.	37
14 lentelė. Gniuždimo jėgos atsparis.	38
15 lentelė. Vandens įsiskverbimo rezultatai.....	39
16 lentelė. Chlorido jonų prasiskverbimo koeficientai.	40
17 lentelė. Betono prognozuojamas atsparumas šalčiui.....	41

Paveikslų sąrašas

1 pav. Fermentinės anglies rūgšties diamido hidrolizės ir CaCO_3 susidarymo schema.....	13
2 pav. CaCO_3 susidarymo reakcija.....	13
3 pav. Mikro kapsulių gamybos schema.....	14
4 pav. Vandens įgeriamumas po 28 parų.....	16
5 pav. Savaimė atsinaujinančio betono efektyvumas esant nepertraukiamam užšaldymo/atšildymo ciklui 1(1) ir esant su pertraukom užšaldymo/atšildymo ciklui (2).....	17
6 pav. Savaimė atsinaujinančio betono gniuždymo stiprumo kitimas atsižvelgiant į užšalimo koeficientą: a) kai užšaldymo temperatūra -17°C ; b) kai užšaldymo temperatūra -50°C ; 1) esant nepertraukiamam užšaldymo/ atšildymo ciklui; 2) esant su pertraukom užšaldymo/atšildymo ciklui.....	17
7 pav. Plyšis atvertas cilindro formos bandinyje.....	20
8 pav. Dujų pralaidumo bandymo matavimo schema.....	21
9 pav. Bandymui naudoto prietaiso schema. (1) Aliuminis korpusas; (2) sandarinimo membrana; (3) tvirtinimo varžtai; (4) bandinys; (5) slegiama zona; (6) oro išleidimo vožtuvas; (7) matuojamas vandens slėgis; (8) vandens įleidimo vamzdis; (9) apsauginis žiedas; (10) atrama; (11) vandens pratekėjimo srauto matavimas.....	23
10 pav. Malto dolomito miltelių dalelių pasiskirstymas pagal dydį.....	25
11 pav. Cemento dalelių pasiskirstymas pagal dydį.....	26
12 pav. Vandens prasiskverbimo gylio nustatymas.....	28
13 pav. Vandens įsiskverbimo į betoną bandymo prietaisai.....	28
14 pav. Vandens įsiskverbimo į betoną bandymo prietaisai.....	28
15 pav. Elektros srovės šaltinis Vooltcraft vlp-2043.....	29
16 pav. Bandinio sujungimo schema.....	29
17 pav. Bandinių sujungimas su prietaisu.....	30
18 pav. Betono atsparumo šalčiui priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus K_s	31
20 pav. Plyšio atvėrimo principinė schema.....	32
19 pav. Bandinio vandens įgerties matavimo principinė schema.....	32
21 pav. Santykinės susitraukimo deformacijos.....	34
22 pav. Bandinių atsparumas lenkimui.....	35
23 pav. . Gniuždomojo stiprumo palyginimas.....	36
24 pav. Santykinės susitraukimo deformacijos.....	37
25 pav. Atsparumo lenkimui palyginimas.....	37
26 pav. Gniuždomojo stiprumo palyginimas.....	38
27 pav. Gniuždomojo stiprumo palyginimas.....	39
29 pav. Bandinys KP.....	40
28 pav. Bandinys K.....	40
31 pav. Bandinys KPD10.....	41
30 pav. Bandinys KPD20.....	41
33 pav. Vandens prasiskverbimo sumažėjimas.....	42
32 pav. Vandens prasiskverbimo bandiniuose atvėrus plyšį rezultatai.....	42

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

- SEM – skenuojantis elektronais mikroskopas
- XRD – rentgeno spindulių difrakcija
- EDS – energijos dispersijos rentgeno spindulių spektroskopija
- RSD – rentgeno spindulių difrakcija
- MDI – metileno difenilo diizocianatas
- PAM – paviršiaus aktyviosios medžiagos
- MDI – metileno difenilizocianatas
- SSB – savaime susitankinantis betonas
- FA – anglies pelenai
- GŠ – granuluotas šlakas
- CSA – sulfatuminato pagrindu veikiančys ekspansyvieji priedai
- CA – kristaliniai mišiniai
- SAB – savaime atsinaujinančio betono mišinys

Įvadas

Betonas yra viena pagrindinių statybinių medžiagų pasaulyje, o jo gamyba neatsiejama nuo cemento gamybos. Cemento gamyba pasauliniu mastu užima vieną pirmųjų vietų pramonėje, kuri labiausiai teršia aplinką išskirdama į orą anglies dioksidą. Dėl šio priežasties yra ypač aktualūs savaime atsinaujinančio betono tyrimai, kurie gali padėti sukurti naujo tipo betoną. Betono gamyboje naudojant įvairiausių priedus ir keičiant dalį paties cemento kitomis medžiagomis galima pakeisti jo fizines savybes ir taip sumažinti cemento kiekį, sunaudojamą pasauliniu mastu. Yra ypač aktualu ir svarbu gaminant betoną panaudoti antrines pramonės atliekas, tokias kaip šlakas, stiklas. Be to, reikia kad nauji patobulinti betonai nenusileistų savo fizinėmis savybėmis įprastam betonui bei būtų ilgaamžiškesni. Betono didesnis ilgaamžiškumas sąlygotų mažesnę cemento gamybą ir naudojimą laikui bėgant.

Yra atlikta nemažai tyrimų su savaime atsinaujinančiu betonu naudojant bakterijas bei grybus, tačiau tyrimų su tokiu betonu naudojant kristalinius priedus yra sąlyginai nedaug. Yra ypač nedaug tyrimų tiriant savaime atsinaujinantį betoną su kristaliniiais priedais šalčio atsparumo tema. Taip pat nustatant druskos migraciją į tokį betoną, įsiskverbimo gylį bei greitį, poveikį betono struktūrai. Tokie bandymai kaip vandens kapiliarinė įgertis pro plyšį prieš ir po jo užsivėrimo taip pat yra labai svarbūs užtikrinti betono ilgaamžiškumui. Betono deformacijos jam kietėjant bei jo stipris laikui bėgant yra irgi svarbūs rodikliai, kurie turi būti ištirti, kad užtikrinti reikiamas betono savybes ir išvengti plyšių atsiradimo betone ar jo suirimui. Kadangi vanduo yra viena pagrindinių medžiagų ardančių betoną, vandens prasiskverbimo gylis irgi turi būti nustatytas atliekant vandens prasiskverbimo bandymus.

Atlikus bandymus ir sukūrus betoną, kurio gamybai būtų galima panaudoti antrines pramonės atliekas, jomis pakeičiant dalį cemento, būtų galima sumažinti pasaulinę taršą anglies dioksidu. Pasiekus daug efektyvesnį savaiminį atsinaujinimą su kristalinėmis medžiagomis būtų prailgintas konstrukcijų eksploatavimo laikas kas taip pat duotų ekonominę naudą ir leistų sutaupyti gamtos išteklių.

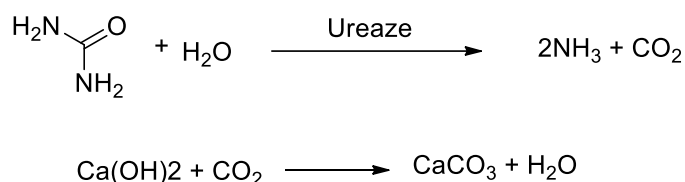
1. Literatūros apžvalga

Betonas pasaulyje yra plačiai naudojama statybinė medžiaga, iš kurios gaminamos įvairios statybinės konstrukcijos. Dažnai pagrindinės statinio laikančiosios dalys, tokios kaip kolonos, sijos, rėmsijos, monolitinės perdangos ir pamatai, yra gaminamos iš gelžbetonio. Laikui bėgant konstrukcijose esantis betonas yra veikiamas mechaninių ir cheminių poveikių, o ilgai šie poveikiai sukelia betono suirimą. Suirimas dažniausiai prasideda nuo plyšių atsiradimo betone. Statiniui tapus nebeekspluatuojamam, jo kapitalinis remontas reikalauja didžiulių investicijų arba statinys tampa nebenaudojamas. Dėl šių priežasčių yra ypač aktualu užtikrinti betono ilgaamžiškumą konstrukcijose. Vienas iš betono ilgaamžiškumo užtikrinimo būdų yra betono savaiminis atsinaujinimas, naudojant įvairius priedus. Dėl savo paklausumo šiuo metu toks betono modifikavimas sulaukia vis daugiau mokslininkų dėmesio.

1.1. Betono įtrūkimų savaiminis atsinaujinimas paremtas bakterijų sudaromomis nuosėdomis

Pastaraisiais metais buvo atlikta nemažai tyrimų, kuriuose betono atsinaujinimą sukelia bakterijos, naudojamos betono mišinyje [1]. Mostafa Seifan mokslininkų grupės atliktame tyrime buvo ištirtas dviejų bakterijų rūšių – *Bacillus sphaericus* ir *Bacillus licheniformis* efektas betono mechaninėms savybėms: gniuždomajam stiprumui ir susitraukimo deformacijoms. Gauti rezultatai parodė, kad įterptos *Bacillus* bakterijų rūšys su geležies oksido nanodalelėmis betono mišinyje nulėmė betono gniuždomojo stiprumo padidėjimą. Tyrimų rezultatai pasirodė daug žadantys, tačiau svarbu atkreipti dėmesį, kad betono mišinį modifikuojant bakterijomis, bakterijų ląstelės turi būti apsaugotos nuo aukšto betono pH bei aplinkos ir šlyties jėgų, susidariusių per betono ruošimo ir kietėjimo laikotarpį. Būtent šioms problemoms spręsti yra siūloma pritaikyti magnetinių bakterijų įterpimą su geležies oksido nanodalelėmis. Nuosėdos biobetonu bandinyje buvo charakterizuotos naudojant SEM, XRD ir EDS metodus. Tyrimo rezultatai patvirtino, kad nusėdę kristalai biobetonu bandinyje yra CaCO_3 tuo tarpu kontroliniame bandinyje CaCO_3 kristalai aptikti nebuvo.

Manoma, kad šiuo metu pats efektyviausias būdas sudaryti CaCO_3 kristalus betone yra paremtas bakterijų sukelta anglies rūgšties diamido hidrolize [2]. Xu Jing'as su mokslininkų grupe sukūrė naują savaiminio betono atsinaujinimo modelį. Šį modelį sudaro *Sporosarcina pasteurii* rūšies bakterijų sporos, maistinės medžiagos: peptonas, jautienos ekstraktas ir mineralizacijos šaltinis - anglies rūgšties diamidas. Medžiagos patalpintos ant porėtų keramzito nešiklių betono liejimo metu. Pastebėta, kad bakterijų sporos yra neaktyvios, iki tol, kol betone neatsiranda mikroįtrūkimų. Manoma, kad per trūkius patenkanti drėgmė ir / ar deguonis suaktyvina sporų metabolinius procesus. Atrasti du savaiminio atsinaujinimo keliai – aerobinis ir anaerobinis. Pirmasis prasideda beveik iškart atsiradus trūkiams ir patekus deguoniui. Anaerobinis paremtas anglies rūgšties diamido hidrolize, kurią katalizuoja bakterijų sintetinamas fermentas ureazė (*I. pav.*). Hidrolizės produktai – amonis ir karbonatas. Dėl padidėjusio pH, pagreitėja CaCO_3 nuosėdų susidarymas.

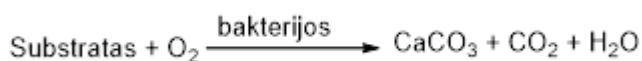


1 pav. Fermentinės anglies rūgšties diamido hidrolizės ir CaCO₃ susidarymo schema

Taip pat buvo ištirta daugelio veiksnių, tokių kaip pH terpės, temperatūros, anglies rūgšties diamido kiekio įtaka CaCO₃ kristalų susidarymui. Esant švelniai pH terpei, tarp 7 ir 9,5, ir 20 °C temperatūrai, didėjant anglies rūgšties diamido kiekiui CaCO₃ kristalų susidarymo greitis didėja. Savaiminio atsinaujinimo efektyvumas buvo tikrinamas vizualiai vertinant plyšių užsivėrimą, atsparumo gniuždymo jėgai padidėjimą ir kapiliarinio vandens įgeriamumą. Analizė parodė, kad įtrūkimai iki 273 μm gali sumažėti iki 86 % per 28 dienas. Atsparumas gniuždymo jėgai padidėjo 24 %, o įgeriamumo koeficientas sumažėjo 27 %.

Pirmą kartą buvo sukurta strategija tiekiant molekulinį deguonį sukurti mikrobu susintetintas kalcio nuosėdas [3]. Toks aerobinis savaiminis betono atsinaujinimas yra palankesnis aplinkai, kadangi aukščiau aptarto anaerobinio proceso metu susidaręs hidrolizės produktas amonis gali teršti aplinką. Pirmą, buvo sukurta deguonį paleidžianti tabletė, sudaryta iš CaO₂ ir pieno rūgšties santykiu 9:1. Ši tabletė gali stabiliai tiekti deguonį ir palaikyti pH intervale nuo 9.5 iki 11.0, 45 dienas, palaikant kontaktą su vandeniu. Esant deguoniui, savaiminį atsinaujinimą sukeliančių H4 linijos bakterijų sporos susidarė efektyviau ir palaikė aukštą metabolinį aktyvumą. Be to, H4 vegetatyvinės ląstelės sudarė daugiau kalcio nuosėdų negu be deguonies aprūpinimo. Galiausiai, buvo sukurta dvilypė atsinaujinimo sistema su bakterinėmis sporomis ir deguonį tiekiančiomis tabletėmis. Kalcio nusodinimo eksperimentai parodė, kad H4 dvilypė atsinaujinimo sistema nusodino 27.5 mM kalcio su deguonies aprūpinimu po 32 dienų, o ištirpusio deguonies koncentracija tirpale sumažėjo nuo 15 mg/l iki 4 mg/l. Tuo tarpu tik 6.9 mM kalcio nuosėdų buvo gauta be deguonies aprūpinimo. Šis darbas atskleidžia deguonies poveikį mikrobinių kalcio nuosėdų susidarymui ir sudaro pagrindą trikomponentėje sistemoje, turinčioje bakterijas, deguonį tiekiančias tabletes ir maistines medžiagas.

Dar vieno tyrimo tikslas buvo rasti naują būdą, kuris leistų pagerinti betono plyšių savaiminį atsinaujinimą sudarant biologines karbonatų nuosėdas [4]. Plyšių užsivėrimui tirti buvo naudojama SEM ir RSD. Betono atsinaujinimo efektyvumas buvo matuojamas vandens skvarbumo tyrimu po ir prieš plyšio sumažėjimą. Plyšiai, kurių plotis 0,48 mm naudojant biocheminę medžiagą, kurią sudaro šarminei terpei atsparios bakterijos *Bacillus sphaericus* ir substratas diatominė žemė beveik visiškai užsitraukė po 80 dienų. Diatominė žemė buvo naudojama apsaugoti bakterijas nuo aukšto pH lygio.



2 pav. CaCO₃ susidarymo reakcija

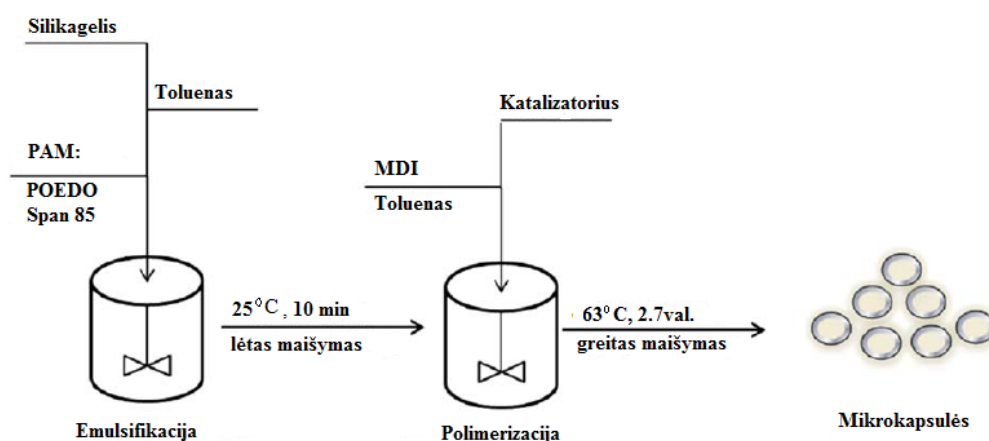
SEM ir RSD analizės rezultatai parodė, kad plyšiuose kalcio karbonatas sudarė sferinę morfologiją. Vandens skvarbos tyrimas parodė, kad biocheminė medžiaga gali ženkliai sumažinti vandens prasiskverbimą į cementą atitinkamai 84 % ir 96 % po 7 ir 28 dienų mirkimo vandenyje. Tuo tarpu kontrolinių pavyzdžių vandens prasiskverbimas sumažėjo 41 % ir 60 %, tai parodo, kad

bakterijomis paremtas CaCO_3 susidarymas yra daug žadantis būdas norint padidinti betono ilgaamžiškumą.

Luo Jing Chen'as su mokslininkų grupe atliko tyrimą, kurio tikslas buvo ištyrinėti savaime atsinaujinantį betoną, kuriame savaiminį atsinaujinimą sukelianti medžiaga yra grybų kultūros [5]. Šios grybų kultūros skatina kalcio mineralų nuosėdų susidarymą, o šios nuosėdos užpildo betono įtrūkimus. Buvo ištirtos šešios skirtingos grybų rūšys *Trichoderma reesei*, *Aspergillus nidulans*, *Cadophora Interclivum*, *Umbeliopsis dimorpha*, *Acidomelania panicicola* ir *Pseudophialophora magnispora*. Visos šios bakterijos buvo parinktos, kad nebūtų toksiškos aplinkai, nesukeltų jokių sveikatos sutrikimų žmogui, gyvūnams bei nebūtų kenksmingos augalams. Taip pat šios grybų rūšys turėjo pasižymėti atsparumu aukštai šarminiai aplinkai, kai pH yra 13. Atliekant tyrimą su šiomis grybų rūšimis, kiekviena skirtinga grybų terpe buvo aptepama betono plokštė ir stebimi vykstantys pokyčiai. Buvo pastebėta, kad irstant betonui, tirpsta Ca(OH)_2 , o tai lemia didelį betono pH pokytį: pH, kurio normali vertė 6,5 pakyla iki 13,0. Nepaisant tokio pokyčio, *Trichoderma reesei* grybų sporos augo vienodai tiek betone, tiek ten, kur jo nebuvo. RSD ir SEM metodai patvirtino, kad grybų nusodinti kristalai buvo sudaryti iš kalcito. Šie rezultatai rodo, kad *T. reesei* grybų rūšis yra potencialiai tinkanti grybų rūšis, norint sukurti biologiškai savaime atsinaujinantį betoną, kuris lemtų tvarią ir ilgaamžę struktūrą.

1.2. Betono plyšių savaiminis atsinaujinimas, paremtas mineralinėmis medžiagomis

Savaiminiam betono atsinaujino procesui taip pat galima naudoti ne tik bakterijas ar grybus, bet ir mineralines medžiagas. Noel Peter Bengzon'as su savo mokslininkų grupe atliko tyrimą naujai savaime atsinaujinančiai medžiagai sukurti, kuri buvo suformuota silicio dioksido mikroenkapsuliacijos būdu, vykdant poli- (karbamido-uretano) polimerizaciją [6]. Buvo susintetintos 60 – 120 mm dydžio lygios, vienalytės ir sferinės kapsulės bei ištyrinėti ir optimizuoti emulsifikacijos ir polimerizacijos sintezės etapai. Silicio dioksido emulsifikacijos etapui paviršiaus aktyvumo medžiagose yra svarbi hidrofilinio-lipofilinio balanso reikšmė, kuri gali varijuoti tarp 3,0 – 5,0 ir 500 rpm sukimosi greičio. Polimerizacijai svarbu palaikyti 900 rpm greitį ir monomero metileno diizocianato koncentraciją ne mažesnę nei 15 %. Laikantis šių sąlygų gaunamos reikiamo dydžio lygios mikrokapsulės. Tyrimo metu buvo ištirtos mikrokapsulių viskoelastinės savybės, o tolesni tyrimai atlikti naudojantis SEM, EDS ir Furjė transformacijos infraraudonųjų spektroskopijos metodais. Užsipildžius mikroplyšiams betone, rezultatai parodė, kad naudojant tokias mikrokapsules ženkliai padidėja betono atsparumas gniuždymui ir lenkimui.



3 pav. Mikrokapsulių gamybos schema

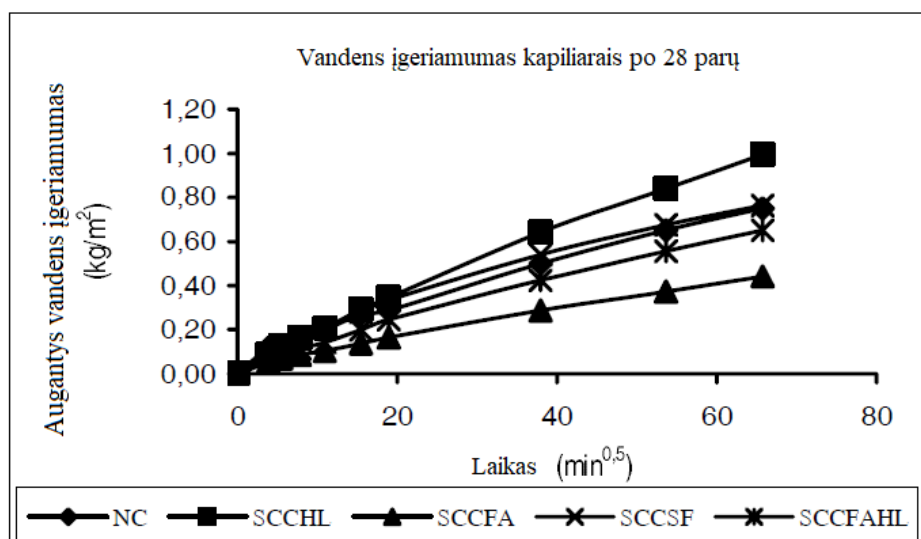
Savaime atsinaujinančio betono reiškinys pastebėtas ir tradiciniame savaime susitankinančiajame betone su polimeriniais priedais [7]. Tyrimas buvo atliktas su I ir V tipo portlandcemenčiu, pridėjus į juos stireno butadieno kaučiuko ir akrilo polimerų. Naudotos stireno butadieno kaučiuko koncentracijos – 5 %, 10 % ir 15 %, o akrilo – 5 % ir 10 %. Atliekant tyrimą buvo nagrinėjami 6 parametrai, tokie kaip: reikalinga polimero dozė, polimero tipas, cemento struktūra cemento tipas, vandens ir cemento santykis bei bandinių stiprumas. Atlikus tyrimą buvo padarytos išvados:

1. Savaiminis atsinaujinimo procesas, pamerkus į vandenį, greičiau vyksta cemente, kuriame nebuvo polimerinių priedų, negu cemente su polimeriniais priedais.
2. Didėjant polimero koncentracijai, didėja ir cemento savaiminio atsinaujinimo laipsnis.
3. Savaiminio atsinaujinimo laipsnis priklauso nuo naudoto polimero tipo.
4. Cemento kiekis neturi reikšmės savaiminio atsinaujinimo laipsniui tiek bandiniuose su polimerų priedais, tiek be jų.
5. Didėjant v/c santykiui, mažėja savaiminio atsinaujinimo laipsnis bandiniuose su polimerų priedais ir be jų.
6. Cemento bandiniai, paruošti naudojant V portlandcementį, pasižymėjo aukštesniu savaiminio atsinaujinimo laipsniu nei bandiniai, paruošti naudojant I portlandcementį.

Dar viename darbe buvo atliktas palyginamasis vandens įgeriamumo tyrimas tarp savaime susitankinančio betono su įvairiais priedais ir įprasto betono, sutankinto vibracijos būdu [8]. Savaime susitankinančiame betone kaip priedai buvo naudojami pelenai, mikrosilika, hidraulinės kalkės ir pelenų ir hidraulinių kalkių mišinys, taip pat buvo naudoti modifikuoti karboksilatų superplastikliai, kad būtų pasiektas reikiamas sistemos tinkamumas. Kapiliarinė įgertis betonui buvo vykdoma po 7, 14 ir 28 dienų kietėjimo.

1 lentelė. Mišinių sudėtys.

	NC	SCCFA	SCCSF	SCCHL	SCCFAHL
Cementas (kg/m ³)	410	390	384	384	384
Pelenai (kg/m ³)	xx	58	xx	xx	xx
Mikrosilika (kg/m ³)	xx	xx	38	xx	xx
Hidraulinės kalkės (kg/m ³)	xx	xx	xx	77	38
Smėlis 0,15–0,6 mm (kg/m ³) Mf* = 2,8	360	437	418	418	418
Smėlis 0,3–2,4 mm (kg/m ³) Mf* = 4,5	360	437	418	418	418
Užpildas 6–15 mm (kg/m ³)	1127	881	863	891	891
Vanduo/cementas (kg/kg)	0.4	0.4	0.55	0.48	0.48
Superplastikis „Viscocrete“ 3000 (%)	1.5	2.5	2.4	2.4	2.4
Vanduo/milteliai (kg/kg)	0.4	0.35	0.36	0.33	0.33



4 pav. Vandens įgeriamumas po 28 parų.

Rezultatai leidžia daryti išvadą, kad priedai suminkština betoną. Kapiliarinės įgerties rezultatai yra išreikšti įgerties koeficientais (parametras, kuriuo remiantis galima numatyti ilgaamžiškumą). Savaimė susitankinančio betono įgerties koeficientai buvo arba lygūs, arba geresni nei įprasto betono, sutankinto vibracijos būdu. Lyginant kapiliarinės įgerties duomenis, geriausiais rezultatais pasižymėjo betonas, kuriame kaip priedas buvo naudojami pelenai. Naudojant tokį pat kiekį hidraulinių kalkių taip pat pagerino betono kokybę per 28 dienas. Mikrosilika, nors ir yra brangesnis betono priedas, tačiau naudojant šį priedą rezultatai yra labai panašūs į įprasto betono, sutankinto vibracijos būdu. Manoma, kad tokius rezultatus lėmė mikrosilikos ir superplastiklio nesuderinamumas.

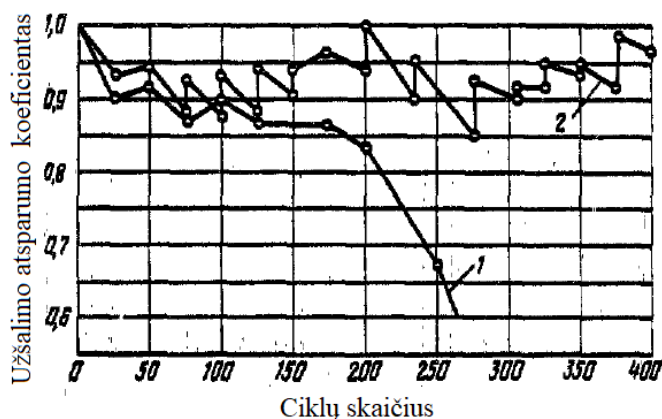
Kitame moksliniame tyrime nagrinėjami cementiniai kompozitai, turintys įvairių papildomų cementinių medžiagų, tokių kaip akmens pelenai, lakieji pelenai ir šlakas [9]. Buvo ištirtos jų savybės, tiriant jų tempimo deformacijas, kietėjimo sąlygas ir chlorido jonų pralaidumą. Bandymo metu mikroplyšiai buvo sudaryti betono kompozituose tempiant bandinius, o cilindriniai bandiniai buvo apkrauti ir deformuoti keliais etapais. Po to, mechanškai paveikti ir nesugadinti kontroliniai cementiniai kompozito bandiniai buvo veikiami trijų skirtingų kietėjimo sąlygų: nepertraukiamo drėgnumo, nepertraukiamo oro ir atšaldymo-atšildymo ciklo iki 2 mėnesių. Savaimė atsinaujinimo greičiui ir mastui įvertinti buvo naudojamas greitas chlorido pralaidumo bandymas, mikroskopinis stebėjimas ir mikrostruktūrinė analizė. Bandymų rezultatai rodo, kad papildomos cementinės medžiagos tipas lemia atsinaujinimo galimybes. Cementiniai kompozito mėginiai su pelenais gali geriau atsinaujinti. Taip pat buvo pastebėtas ryškus ir aiškus savaiminis atsinaujinimas cementiniame kompozite su šlaku.

Yra įrodyta, kad jei betonas buvo paveiktas apkrova, tačiau ne iki suirimo ir yra palanki temperatūra ir drėgmės sąlygos, betonas gali iš dalies arba visiškai atgauti savo pradinį kietumą [10]. Ciklinio šaldymo ir atšildymo metu betone atsiranda vidiniai įtempiai, dėl kurių susidaro mikroplyšiai, kurie pakeičia medžiagos struktūrą, panašiai kaip pakeičia išorinė apkrova. Dėl susidariusių mikroplyšių atsiranda nehidruotos cemento dalelės, kurios sukelia hidrolizės ir hidratacijos procesų vystymąsi. Nedidelių plyšių atsiradimo vietoje, drėgnoje aplinkoje susiformuoja naujas produktas. Kietėjimo metu ore susikarbonuoja kalcio hidroksidas ir mikroplyšiai yra užpildomi kalcitu. Betono struktūros pasikeitimai buvo įvertinti pagal gniuždomąjį stiprumą bei dinaminį tamprumo modulį.

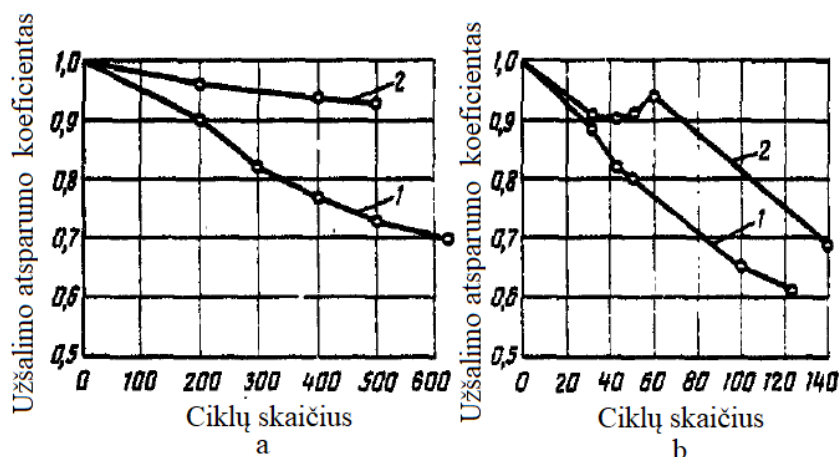
Skiedinio bandiniai buvo paimti po 25 užšaldymo ir atšildymo ciklų ir po to laikyti 30 dienų vandenyje 18 laipsnių temperatūroje. Dinaminio tamprumo modulio stiprumas buvo nustatinėjamas kiekvienos pertraukos pradžioje ir pabaigoje. Betono bandiniai išbandyti pagrindiniu metodu užšaldant -17 laipsnių temperatūroje ir nutraukus užšaldymo ir atšildymo procesą po 200, 400, 470, 500 ir 633 ciklų pakartojimų buvo patalpinti 30 dienų į vandenį. Stiprumas buvo nustatomas kiekvienos pertraukos pabaigoje, o dinaminis tamprumo modulis pašalinus bandinius ir prieš kiekvieną atsparumo šalčiui bandymą. Bandiniai buvo testuojami ir pagreintu metodu pagal tą pačią schemą (užšaldant -50 laipsnių temperatūroje), o pertraukos buvo nustatytos kas 10 užšaldymo ir atšildymo ciklų. Skiedinio ir betono stiprumo nustatymo normaliomis kietėjimo sąlygomis rezultatai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Skiedinio ir betono stiprumo nustatymo rezultatai.

Medžiaga	Gniuždomasis stipris, MPa, po tam tikro laiko (dienomis)				Dinaminis tamprumo modulis ($\times 10^3$), MPa, po tam tikro laiko (dienomis)			
	28	90	180	360	28	90	180	360
Skiedinys	15,0	20,8	23,7	26,0	30,6	34,3	35,2	36,3
Betonas	30,2	39,7	43,0	43,8	44,5	47,8	49,1	51,3



5 pav. Savaime atsinaujinančio betono efektyvumas esant nepertraukiamam užšaldymo/atšildymo ciklui 1(1) ir esant su pertraukom užšaldymo/atšildymo ciklui (2).



6 pav. Savaime atsinaujinančio betono gniuždomo stiprumo kitimas atsižvelgiant į užšalimo koeficientą: a) kai užšaldymo temperatūra -17°C; b) kai užšaldymo temperatūra -50°C; 1) esant nepertraukiamam užšaldymo/ atšildymo ciklui; 2) esant su pertraukom užšaldymo/atšildymo ciklui.

Taip pat buvo ištirtas mineralų įterpimo į įvairius kompozitus efektas (silicio pagrindu sukurtų medžiagų, cheminių pigmentų medžiagos, įpurškiamų mineralų ir kristalinių komponentų) [11]. Savaiminio atsinaujinimo efektyvumas buvo įvertintas atliekant vandens pralaidumo testus, apskaičiuojant atsivėrusių plyšių pločius ir ištiriant vandens sugeriamumą skiediniuose, kuriuose buvo atsivėrę plyšiai juos gniuždant ar plėšiant. Padarytos išvados, kad aukšta pH terpė (apie 10) ir aukšta temperatūra pagreitina plyšio užsitraukimą. Nustatyta, kad atsinaujinimas yra efektyvesnis naudojant mineralų kombinacijas negu vieną mineralą. Taip pat nuspręsta, kad kalcio karbonato nusodinimas, kuris palaiko aukštesnes pH vertes ir didesnę kalcio jonų kiekį, yra pagrindinis paviršiaus plyšių užsivėrimo veiksnys. Šį veiksnių sukelia keturių rūšių mineralinių priedų (silicio pagrindu pagamintų komponentų, cheminių ekspansyvių medžiagų, besiplečiančių mineralų ir kristalų komponentų) poveikis. Plyšių užsivėrimo efektyvumas buvo įvertintas pralaidumo koeficientais, paviršiaus plyšių pločiais ir bandinių vandens sugeriamumu naudojant iš anksto deformuotus supleišėjusius bandinius.

Dar viename moksliniame darbe siūloma nauja savaiminio atsinaujinimo betono technologija [12]. Ši technologija yra pagrįsta kapsuliavimo metodu, kai atsinaujinimą sukelti medžiaga atsitiktinai paskirstoma medžiagoje. Sukurti kapsulėms buvo naudojamos dvi skirtingos apvalkalų rūšys: stiklo rutuliai ir farmacinės kapsulės. Kuriant apvalkalus buvo atsižvelgta, kad medžiaga, iš kurios turi būti pagamintas apvalkalas, turi būti inertiška atsinaujinimą sukeliančios medžiagos atžvilgiu, taip pat apvalkalas turi nesuirti maišymo metu priešinant dideliems įtempimams ir tuo pačiu metu turi galėti suirti, kai betone atsiranda plyšiai. Taip pat svarbu, kad medžiaga turėtų gerą suderinamumą su betono mišiniu. Šiame darbe buvo pasiūlyta nauja betono gamybos technologija: stiklinės mažos sferos ir farmacinės kapsulės nuo 0.8 mm iki 4 mm dydžio buvo užpildytos natrio silikatu, kuris veikia kaip gydomoji medžiaga. Buvo padaryti du bandiniai su stikline sferom įdedant po 35 sferas į bandinį, du bandiniai su farmacine kapsulėm įdedant į bandinį po 30 tokių kapsulių ir vienas bandinys su 15 stiklinių sferų ir 15 farmacinių kapsulių. Suformuoti bandiniai po maždaug 20-24 val. buvo 7 paras laikomi vandenyje. Po 7 parų kietėjimo bandiniai buvo išmontuoti ir lenkiami trijų taškų lenkimo metodu iki kol atsivėrė bandiniuose 0.25 mm plyšis. Po to bandiniai buvo laikomi 28 paras $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ temperatūroje ir 90% santykinėje drėgmėje. Gauti rezultatai parodė, kad dalis natrio silikato buvo efektyviai išlaisvinta iš kapsulių. Ištrūkus natrio silikatui dalis jos sėkmingai pasklido po bandinio cementinę matricą ir padėjo bandiniams atkurti dalį savo pradinio stiprumo. Apskaičiuotas betono stiprumo atsikūrimo indeksas, kuris bandiniams su stiklo sferų apvalkalais gavosi 2,99%, o su farmacinėmis kapsulėmis - 2,12%.

Dar viename tyrime nagrinėjama ekspansyvių mineralų, tokių kaip magnio oksidas, bentonito molis ir kalkės, poveikis ankstyvajam portlandcemenčio atsinaujinimui [13]. Atsinaujinimo efektyvumas buvo lyginamas atliekant lenkiamojo stiprumo, plyšio sandarinimo ir pralaidumo bandymus. Medžiagų mikrostruktūriniai tyrimai buvo atliekami naudojant RSD, termogravimetrinę analizę ir SEM. Hidruoti ir plečiantys ekspansyvių mineralų produktai veiksmingai prisidėjo prie gydomųjų medžiagų gamybos. Plyšiai 180 mikronų diapazone buvo atsinaujinę efektyviau mineralų turinčiuose mišiniuose po 28 parų. Savaiminis atsinaujinimas turėjo įtakos stiprumo atsistatymui (sudarant kristalus plyšiuose) bei ilgaamžiškumo pagerinimui. Galima daryti tokias išvadas: nehidruotų cementavimo ir ekspansyvių mineralų hidratacija inicijavo lenkiamojo stiprumo atkūrimą, plyšių užtaisymą ir dujų pralaidumo sumažėjimą. Eksploatacinių savybių stiprumas ir plyšių užtaisymo efektyvumas ekspansyvių mineralų turinčiuose cemento mišiniuose pagerėjo atitinkamai iki 60% ir 95%, palyginti su 8% ir 56% 100% cemento mišinyje. Mineralinių medžiagų

turinčių mišinių dujų pralaidumo koeficientas sumažėjo iki 69%, lyginant su bandiniais be tokių priedų. Tai rodo ilgaamžiškumo pagerėjimą dėl ekspansyvių mineralų pakaitalo. Mikrostruktūrinis pradinis cemento mišinių tyrimas patvirtina, kad cemento matricoje esančių hidratuotų, tiek išsiplėtusių mineralų fazių skirtumas nemažas. Dažni gydomieji junginiai buvo kalcitas, portlanditas, etringitas ir C-S-H. Magnio oksido susidarymas formuojant brucitą, kitus magnio hidrokarbonato produktus. Bentonitas turėjo įtakos etringito ir sluoksninių mikrostruktūrų susidarymui. Efektyvus gydymas buvo pastebėtas 5% mišinio pakeitus individualiais mineraliniais pakaitalais, 5% MgO ir bentonito mišinio ir 5% kiekvieno mineralinio mišinio.

Taip pat buvo įvairiais būdais ištirtas ir įvertintas pradinis garų efektas, mechaninėms ir ilgaamžiškumo savybėms savaime susitankinančiame betone, kurį sukėlė mineraliniai priedai [14]. Po liejimo betono mėginiai buvo paveikti šešiais skirtingais garų apdorojimo režimais, dviejų skirtingų temperatūrų (60 ir 70 ° C) ir trijų bendrų garuose kietėjimo trukmių (16, 18, 20 val.). Kapiliarinės įgerties, paviršiaus elektrinės varžos ir staigaus chlorido prasiskverbimo bandymo rezultatai, kaip ilgaamžiškumo bandymai, ir mechaninių savybių gniuždymo stiprumas parodė, kad bandinių laikymas aukštesnėje temperatūroje gali žymiai pagerinti stiprumą gniuždymui sukeliant hidrataciją. Didesnė temperatūra duoda didesnę pradinį gniuždomąjį stiprumą, kuris atsiranda dėl sukeltos hidratacijos, C – S – H gelio ir CH kristalinio susidarymo. Tam, kad įvertinti ekonominius rodiklius nustatyta, kad optimalus apdorojimo laikas garuose yra 18 val., kadangi apdorojant 16 val. yra gaunamas šiek tiek mažesnis gniuždomasis stiprumas negu projektinis. Metakaolino didžiausias suspaudimo stipris buvo 60,7 MPa dėl didesnio pucolaninio aktyvumo, kuris skatina ankstyvąją hidrataciją. Pomis kalkakmenis ir vulkaninis tufas gali būti naudojamas vietoj metakaolino. Ilgaamžiškumo bandymai parodė, kad mineraliniai priedai sukelia patvarumo pagerėjimą, nes dėl greitesnio C – S – H gelio ir CH kristalinių medžiagų susidarymo nebelieka vidinių porų.

Šiame straipsnyje pateikiami tyrimų programos rezultatai, susiję su pagrindiniais rodikliais, kurie apibrėžia savaime susitankinančio betono (SSB) sorbcijos, poringumo ir chlorido jonų pralaidumą, patvarumą ir palygina šiuos rodiklius su atitinkamais įprastinio betono parametrais [15]. Rezultatai parodė, kad yra ryšys tarp įvairių ilgaamžiškumo rodiklių ir taikomų konkrečių užpildų priedų įvairiuose mišiniuose. Tokia koreliacija gali būti naudojama SSB ilgaamžiškumui įvertinti, nereikalaujanti laiko sąnaudų su dirbtiniu oru eksperimentinėse procedūrose. Kalbant apie ilgaamžiškumo rodiklius, SSB paprastai turi mažesnes atviras poringumo ir sorbcijos vertes, lyginant su įprastu betonu. Iš tikrųjų, sugeriamumas, kuris yra pagrindinis skysčio transportavimo poringose medžiagose taigi, ir ilgaamžiškumo, parametras, yra bent 30% mažesnis visais atvejais. Nors ši išvada yra pagrįsta ir numatyta, mišiniuose, kuriuose yra cemento pakaitinių medžiagų ir (arba) mažesnis vandens kiekis, ji vis dėlto rodo, kad SSB paprastai yra patvaresni nei įprasti betonai. Remiantis šio tyrimo rezultatais, galima daryti tokias išvadas: SSB mišiniai pasižymi geresniu patvarumo potencialu, lyginant su įprastu betonu, net ir tada, kai pirmasis turi didesnę vandens kiekį. Taip yra dėl padidėjusių smulkių dalelių SSB; pastarosios tobulina mikrostruktūrą, taigi, ir medžiagos porų tinklą. Cemento medžiagų pakeitimas dar labiau pagerina gaminamo mišinio ilgaamžiškumo potencialą, nes pucolaniniai reakcijos produktai gerokai pagerina dalelių įtvirtinimą mikrostruktūroje. Mikrosilika, nors ir šiek tiek sumažina mišinių atvirumą ir kapiliarinę įgertį, tačiau žymiai sumažina chlorido jonų pralaidumą (net 28 dienas). Linijinės koreliacijos tarp visų trijų konkrečių užpildų priedų, naudojamų SSB mišiniuose, ilgaamžiškumo rodiklių rodo, kad pirmą kartą šie požymiai yra susiję, o pakeitimai viename automatiškai paveiks kitus. Tačiau įvairių tipų užpildų priedų įtraukimas į mišinio sudėtį gali pakeisti sukietėjusių bandinių mikrostruktūrą ir

todėl gali nulemti skirtingų tipų koreliacijas. Šiame tyrime pateiktų paprastų ilgaamžiškumo bandymų rezultatai gali būti naudojami siekiant padaryti išvadas dėl galimo SSB mišinių patvarumo.

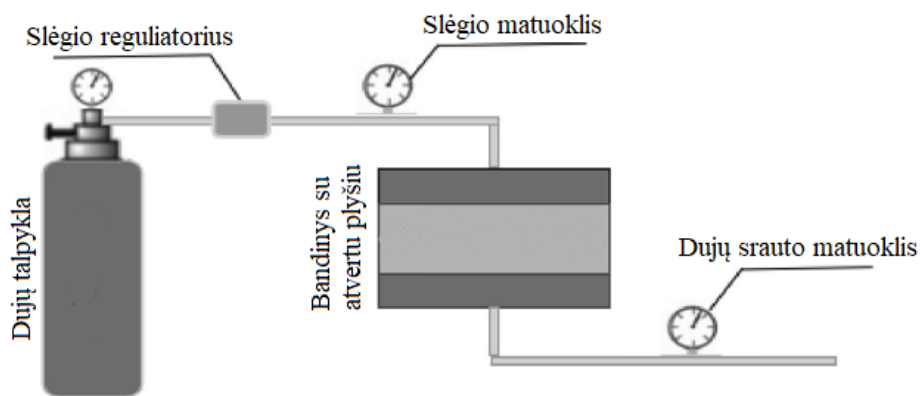
Šiandien vis labiau paplitę pramoniniai šalutiniai produktai anglies pelenai (FA), granuliuotas šlakas (GŠ), kaip mineraliniai priedai savaime susitankinančio betono gamyboje (SSB) [16]. Šiame tyrime buvo paruoštas SSB su FA, GŠ 20%, 30%, 40%, įvertintos naujos, mechaninės, ilgaamžiškumo savybės ir SSB poringumas. FA, GŠ buvimas padidino pradinį betono smukumą ir sumažino smukumo nuostolių greitį, drėgną SSB tankį ir pailgino cemento pastos nustatymo laiką, FA, GŠ naudojimas SSB akivaizdžiai neturėjo įtakos tekėjimui ir SSB stabilumui. Be to, cemento keitimas FA, GŠ, SSB, sumažino mechanines savybes ir padidino vandens poringumą ankstyvame etape, mechaninių savybių ir vandens poringumo skirtumai tarp kontrolinio SSB, FA, GŠ SSB buvo nereikšmingi vėlesniame kietėjimo etape. Nors FA, GŠ serija SSB parodė didesnę angliavandenilių gylį nei kontrolinis SSB, tačiau, naudojant FA GŠ SSB atsparumas buvo efektyvesnis chlorido jonų migracijai ir betono traukumui. 7 dienų kietėjimo laikotarpiu FA, GŠ serijos SSB, SSB gniuždymo stipris ir tempiamasis stipris buvo 9,43% 26,77%, 5,63% 14,21% ir 7,22% 25,45%, 4,02% 13,40 %, SSB vandens poringumas padidėjo 4,65% 7,31%, 2,95% 6,13%, palyginti su kontroliniu SSB. Vėlesniame kietėjimo laikotarpyje (90 dienų) kontrolinių ir SSB, FA, GŠ SSB mėginių mechaninių savybių ir vandens poringumo skirtumai buvo nereikšmingi. SSB mišinių su FA, GŠ chlorido jonų difuzijos koeficientas buvo mažesnis už kontrolinį SSB. 56 dienų džiovavimo metu visų SSB mišinių mėginių džiovavimo susitraukimo vertės buvo 0,075% ribose, kaip reikalauja Australijos standartas AS 3600. Taip pat FA sumaišytas su SSB turėjo geresnį smukumą ir jo išlaikymą, susitraukimą ir ilgesnį savybių išlaikymą cemento pastos negu GŠ sumaišytas su SSB. Tačiau panaudojant FA, SSB sumažėjo drėgmės tankis, mechaninės savybės ir didesnis vandens poringumas, karbonizacijos gylis ir chlorido jonų difuzijos koeficientas, nei SSB su GŠ.

Šiame tyrime buvo atlikti eksperimentiniai betono atsinaujinimo tyrimai nustatyti jo efektyvumui [17]. Pagrindinės tyrimo medžiagos sulfatuminato pagrindu veikiančys ekspansyvieji priedai (SCA), kristaliniai mišiniai Xypex Admix C-1000NF (CA) ir kalcio vandenilio fosfatas buvo naudojami kaip cemento medžiagų dalis, o aktyvūs keramzitas buvo natrio karbonato tirpalo nešiklis. Bandymams atlikti buvo suformuoti 40x40x160mm matmenų prizmės ir 10cm diametro ir 5cm storio cilindro formos bandiniai. Siekiant išsiaiškinti metodo pagrįstumą ir optimizuoti mišinio proporcijas, buvo atliktas plyšių plotų kiekybinis įvertinimas.



7 pav. Plyšis atvertas cilindro formos bandinyje.

Dujų pralaidumo testas buvo atliktas dvejiems, su iš anksto atvertais plyšiais, bandiniams. Po 28 dienų kietėjimo vandenyje bandiniai su plyšiais ir keramzitu bei natrio karbonatai ir atitinkamomis proporcijomis priedų žymiai efektyviau sumažino plyšius bei dujų pralaidumą lyginant sukontroliniais bandiniais be tokių priedų.



8 pav. Dujų pralaidumo bandymo matavimo schema.

Skenuojančio elektronais mikroskopo (SEM) rezultatai parodė gilesnį gijimo produktų (CaCO_3) susidarymą siūlomo mišinio įtrūkiuose, lyginant su kontroliniu mišiniu. Šis tyrimas buvo pasiūlytas kaip keramzito impregnacija natrio karbonatu kartu su skirtingais priedais, kaip naujas metodas, siekiant pagerinti betono savarankiško atsinaujinimo pajėgumą. Atliekant tyrimą buvo vertinamas įtrūkimų sumažėjimas ir dujų pralaidumas, atlikta mikrostruktūrų analizė ir nagrinėjamas metodo įgyvendinamumas ir veiksmingumas. Gauti rezultatai rodo, kad mineraliniai priedai (CSA , CA ir CaHPO_4) ir keramzito naudojimas kaip natrio karbonato talpykla yra daug žadantys metodai, leidžiantys sukurti savarankišką betono atsinaujinimą. Tačiau priedų proporcijos gerokai įtakoja gijimo efektyvumą, todėl siūlomi mišiniai su priimtiniu savaiminiu atsinaujinimo proceso efektyvumu. Pagrindinę plyšio užsidarymo priežastį visose grupėse nulėmė CaCO_3 susidarymas. Tačiau viename mišinyje, kuriame yra tiek prieš absorbuoto keramzito, tiek priedų, kalcito nusodinimas buvo nustatytas gilesnėse padėtyse (10 mm gylyje nuo plyšio žiočių), palyginti su kontroliniu mišiniu. Be to, eksperimentiniai tyrimo rezultatai rodo, kad plyšius susidarymo metodu, naudojant įmontuotą vielinį tinklėlį su juostos tarpu, ir metodu, skirtas plyšius pasikeitimui apibūdinti matuojant jo plotą, yra potencialiai reikšmingi.

Šiame tyrime buvo atlikti bandymai norint išnagrinėti betono stiprumo sumažėjimą, kuris yra susijęs su kalcio nitrato mikrokapsulių buvimu betone [18]. Šis tyrimas taip pat siūlo modifikacijas kalcio nitrato mikroenkapsuliacijos procedūrai, kurios padėtų sumažinti betono stiprumo mažėjimą. Didžioji dalis tokių modifikacijų leidžia keisti nepertraukiamos fazės sudėtį, tačiau leidžia išlaikyti tą patį vandeninės fazės kiekį. Nepertraukiama fazė buvo ruošama taip: 1%–10% hidrofilinio-lipofilinio emulsiklio ir 0,1%–1,0% riebaluose tirpios sulfonrūgšties katalizatoriaus buvo ištirpinti organiniame tirpiklyje. Vidutinis mikrokapsulių diametras ir tankumas buvo tiriamas SEM pagalba. Praskiesti bandiniai buvo ruošiami iš įvairių kalcio nitrato kiekių, kurie buvo įkapsuliuoti pagal modifikuotą metodiką. Šiems bandiniams taip pat buvo matuojamas atsparumas gniuždymo ir lenkimo jėgoms ir apskaičiuoti tamprumo moduliai. Rezultatai parodė, kad kai naudojamas modifikuotas mikrokapsuliacijos metodas, toks betonai pasižymi statistiškai ne itin reikšmingu gniuždymo ir lenkimo stiprumo sumažėjimu lyginant su originaliu įkapsuliacijos metodu. SEM

mikrografose matyti paviršiaus pjūvis, kuriame yra matomos mikrokapsulės. Manoma, kad stiprumo sumažėjimas galėjo atsirasti dėl nehidratuotų dalelių aglomeracijos. Tačiau šiame darbe pasiūlytu įkapsuliacijos būdu pagamintų kapsulių turintis betonas pasižymėjo didesniu atsparumu gniuždymo ir lenkimo jėgoms, nei prieš tai naudotais įkapsuliacijos metodais.

Kito tyrimo tikslas buvo išanalizuoti savaiminį atsinaujinimo efektą su kristaliniais priedais keturiose skirtingose aplinkos sąlygose ir palyginti su kontroliniu betono bandiniu [19]. Atsinaujinimas buvo ištirtas pagal pralaidumo testus per bandinyje esančius įtrūkimus bei buvo išanalizuoti užsivėrę plyšiai, nustatytas jų kiekis ir parametrai stebint juos per mikroskopą. Tiriami plyšiai buvo apie 300 mikronų pločio ir gijo 42 dienas. Rezultatai parodė skirtingą atsinaujinimo elgseną, priklausomai nuo kristalinių priedų pasiskirstymo ir parodė, kad vanduo yra reikalingas atsinaujinimo reakcijoms. Pagrindiniai šio tyrimo tikslai:

1. Išanalizuoti kristalinių priemaišų poveikį, atsižvelgiant į savęs gijimo mechanizmų stiprinimą.
2. Nustatyti aplinkos poveikį betonui su ir be kristalinių priemaišų.
3. Patobulinti ir palyginti metodus įvertinant savaiminio atsinaujinimo savybes iš anksto supleišėtiems bandiniams, remiantis globaliais pralaidumo matavimais bandinyje bei skirtingų geometrinių charakteristikų plyšių matavimais prieš ir po atsinaujinimo.

Iš atlikto tyrimo galima išskirti tokius apibendrinimus:

1. Savaiminio atsinaujinimo greitis apskaičiuotas iš modifikuoto pralaidumo testo šiame tyrime yra patikimas ilgaamžiškumo savybių indikatorius.
2. Atliekant plyšio geometrijos analizę ir įvertinus plyšių geometrijos parametrus yra aiškus ryšys su vandens srauto rezultatais lyginant srautą su vidutiniu plotu (Amm) ar vidutiniu plyšio pločiu. Šie parametrai gali būti naudojami kaip alternatyva vandens pralaidumo matavimo bandymams. Tačiau kaip atsinaujinimo indikatoriai šie parametrai turi didelę kontrolinių bandinių sklaidą.
3. Vis dėlto, atsižvelgiant į plyšio geometrijos parametrus, plyšių kiekio skaičiavimas skaičiuojant juodas dėmeles plote turėjo didžiausią sklaidą.
4. Bandiniai su kristaliniais priedais parodė didesnę stabilumą ir patikimumą savaiminio atsinaujinimo bandymuose, kurie nulėmė mažesnę sklaidą ir aiškesnes tendencijas.
5. Bandiniai su kristaliniais priedais ir laikomi panardinti į vandenį pasiekė didesnę atsinaujinimo spartą apytiksliai 0,95, net ir didesniuose pradiniuose plyšiuose apie 0,25mm pločio, ir keletas bandinių buvo pilnai atsinaujinę.
6. Keturios aplinkos sąlygos buvo: panardinimas į vandenį apie 0,9, kontaktas su vandeniu 0,8, drėgmės kamera 0,15, oro poveikis 0,15.

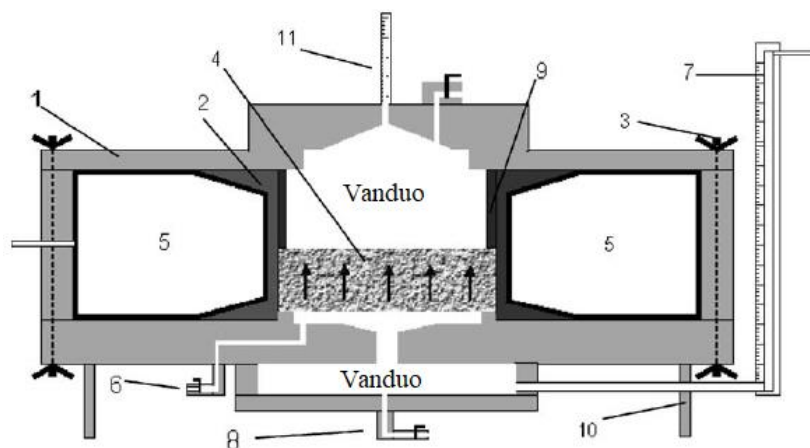
Plyšiai betone gali pabloginti betono mechanines savybes bei jo ilgaamžiškumą [20]. Atlikti tyrimai parodė, kad plyšiai gali patys užsitaistyti be jokios išorinės pagalbos. Požeminėms betoninėms konstrukcijoms vanduo yra būtinas atsinaujinimo metu mineraliniuose prieduose vykstančioms cheminėms reakcijoms. Šiame darbe savaiminis atsinaujinimo procesas paremtas mineraliniais priedais ir ištirtas pagal chemines ir fizines savybes bei požemines aplinkos sąlygas. Atsinaujinimo pajėgumas trijų skirtingų kristalinių mineralinių medžiagų, tokių kaip kalcio karbonatas, kalcio sulfoaluminatas, metakaolinas, buvo pasiektas dėl mechaninių savybių kaip medžiagų išsiplėtimas ir pucolaninių darinių susidarymas. Buvo pastebėtos atsinaujinimo metu susidariusių naujų produktų morfologijos, kurios atsirado plyšių vietose. Rezultatai rodo, kad bandiniai, sujungti su trimis mineraliniais priedais, rodo skirtingus atsinaujinimo pajėgumus pagal pagerintas mechanines savybes ir pralaidumą. Pralaidumas pro bandinio matricą gerokai sumažėjo nuo natūralaus metakoalino plyšio užtaisymo tuo tarpu kai žymesnio vandens pralaidumo buvo negalima pastebėti

bandiniuose su išsiplečiančiomis medžiagomis. Bandiniai su kalcio karbonatu parodė geriausią mechaninių savybių atsikūrimą tokių kaip santykinis tamprumo modulis ir gniuždomasis atsparumas. Nors dominuojantis elementas yra CaCO_3 , reaguojant CO_3 iš ištirpusio CO_2 arba iš priedų, ir Ca_2 + cementinėje sistemoje užtaisomi įtrūkimai, gijimo pajėgumas labai priklauso nuo naujai suformuotų produktų morfologijos ir savybių.

Iš atlikto tyrimo galima padaryti tokias išvadas:

- Dirbtinai padaryti įtrūkimai gali savaime užsitaistyti ir taip pagerinti santykinį, tamprumo modulį, stiprumą ir atsparumą vandens prasiskverbimui.
- Dominuojantis naujai susiformavęs elementas yra kalcio karbonatas ir gelis CSH.
- Savaiminio atsinaujinimo pajėgumas stipriai priklauso nuo naujai susidariusių produktų morfologijos bei fizinių savybių.

Dar viename tyrime buvo atlikti testai su didelio stiprumo betonais atliekant pralaidumo ir savaiminio atsinaujinimo elgsenos bandymus su supleišėjusiais bandiniais 20°C , 50°C ir 80°C temperatūroje [21]. Tokį tyrimą buvo nuspręsta daryti, kadangi yra padaryta labai mažai tyrimų, kuriuose būtų betono atsinaujinimo procese įvertinta temperatūros įtaką atsinaujinimo procesui. Bandiniai buvo padaryti iš cilindro formos 150 mm diametro ir 50 mm storio. Į juos buvo prieš tai įdėta armatūra keturiomis skirtingomis schemomis. Bandiniuose buvo atverti mikro plyšiai 0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm pločio. Visi bandiniai buvo įdedami į specialų prietaisą, kuriame buvo leidžiama bandiniams atsinaujinti, tai yra užsiverti plyšiams trijose skirtingose vandens temperatūrose. Po to buvo lyginami rezultatai, kokioje temperatūroje ir kokio pločio plyšiai greičiausiai užsitraukė. Rezultatai atskleidė, kad dėl temperatūros padidėjo vandens prasiskverbimas. Taip pat buvo pastebėta, kad mažesni plyšiai užsitraukė daug greičiau negu didesni plyšiai. Esant 1 Mpa hidrauliniam slėgiui plyšiai iki 0,1 mm galutinai užsitaistė dėl savaiminio atsinaujinimo proceso.



9 pav. Bandymui naudoto prietaiso schema. (1) Aliuminis korpusas; (2) sandarinimo membrana; (3) tvirtinimo varžtai; (4) bandinys; (5) slėgiama zona; (6) oro išleidimo vožtuvas; (7) matuojamas vandens slėgis; (8) vandens įleidimo vamzdis; (9) apsauginis žiedas; (10) atrama; (11) vandens pratekėjimo srauto matavimas.

C.Manoj Kumaar'o atliktame tyrime buvo sukurtas savaime atsinaujinantis betono mišinys (SAB) su itin sugeriančiu vandenį sintetiniu polimeru $\{CH_2CH(OH)\}_n$, kuris buvo naudojamas kaip savaiminį atsinaujinimą sukelianti medžiaga [22]. Tyrime naudojant cementą 1,5% jo buvo keičiama šiuo polimeru. Kitos medžiagos naudojamos pagaminti betono bandiniams buvo smėlis, skalda, vanduo. Bandymams buvo suformuota po 3 vienetus 150x150x150 mm matmenų kubelių, 3 vnt. kontroliniai be polimero (CC) ir dar 3 vnt. su polimeriniu priedu. Prieš tyrimą buvo pakeista cemento 1% ir 1,5% polimerų ir po 7 parų kietėjimo vandenyje buvo palygintas bandinių gniuždomasis stipris ir nustatyta, kad bandiniai su 1,5% polimeriniu priedu įgijo 18% didesnę stiprį lyginant su bandiniais, kuriuose buvo 1% cemento pakeista polimeru, todėl bandymai buvo tęsiami keičiant 1,5% cemento polimerais. Atliekant bandymus, bandiniai buvo gniuždomi ir matuojamas jų gniuždomasis stiprumas (žiūrėti 3 lentelę).

3 lentelė. Gniuždomasis bandinių stipris.

Nr.	Jėgos apibūdinimas	Laikas (paromis)	Vidutinis gniuždomasis stipris (Mpa)	
			CC	SHC
1	Gniuždomasis stipris	7	27.19	21.46
2	Gniuždomasis stipris	21	37.63	35.92
3	Gniuždomasis stipris	28	41.44	39.93
4	Gniuždomasis stipris prieš atsiveriant mikro plyšiai	28	37.3	27.4
5	Gniuždomasis stipris po plyšio užsitaisymo	56	40.73	42.5

Bandių rezultatai buvo lyginami naudojant terminę analizę. Buvo atlikta termogravimetrijos analizė (TGA) ir diferencinė skanavimo kalometrija dvejiems bandiniams. Nustatyta, kad bandiniuose SHC hidroksilinimas buvo didesnis 78% negu bandiniuose CC. Tai parodo, kad bandiniuose su polimerais daug greičiau susidaro kalcito dariniai, kurie vėliau gali virsti į kalcio karbonatus. Kalcio karbonatas yra pagrindinė plyšių užsitaisymo medžiaga.

Atlikus literatūros analizę paaiškėjo, kad savaime atsinaujinantis betonas yra nauja ir tobulėjanti tyrimų sritis, kurios tikslas pagerinti pastatų ilgaamžiškumą. Dažniausiai buvo atliekami tyrimai, kai į betoną buvo įmaišomi įvairūs priedai (pelenai, hidraulinės kalkės ir kt.). Taip pat nemažai tyrimų atliekama su biologiškai savaime atsinaujinančiu betonu. Tokie tyrimai kai betono mikro įtrūkimai sumažėja dėl bakterijų sukeltų kalcio nuosėdų susidarymo, yra nauja ir daug žadanti sritis. Tačiau savaime atsinaujinantis ir susitankinantis betono su kristalizaciniais priedais ilgaamžiškumo tyrimų yra mažai. Todėl yra aktualu plačiau ištirti šią tematiką, gautus rezultatus palyginti su jau atliktais tyrimais.

2. Tyrimų metodologija

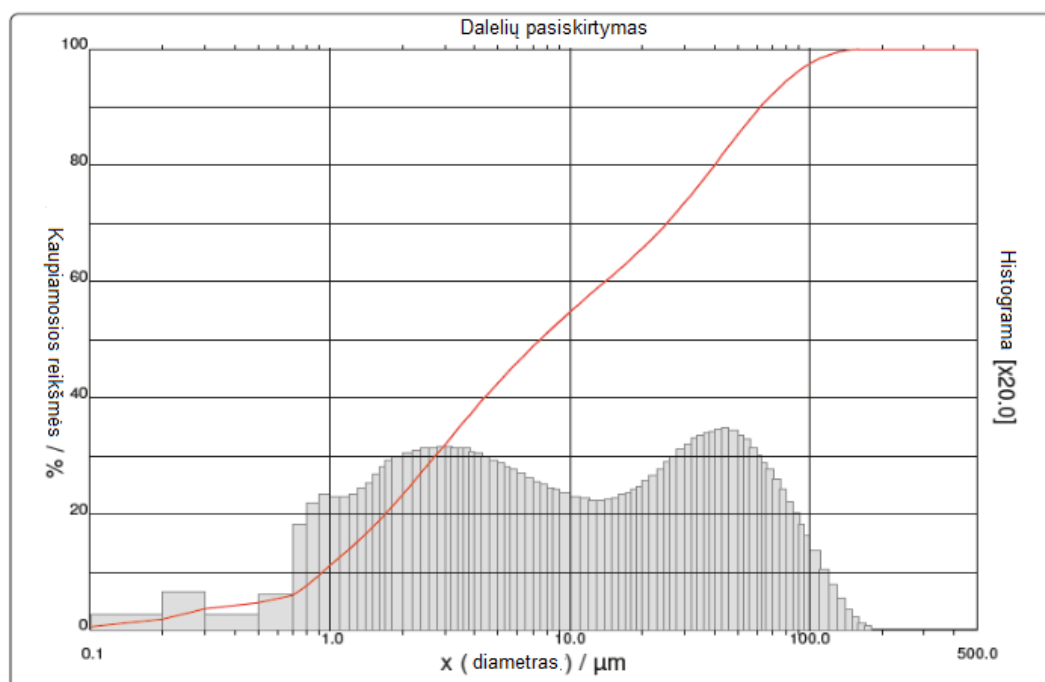
2.1. Betono prizmelių su dolomitu gniuždomojo stiprumo ir deformacijų nustatymas

Pirmųjų bandinių pagrindinė papildoma tiriamoji medžiaga buvo dolomitas. Naudojant smulkintą dolomitą, kurio dalelių smulkumas mažesnis už cemento, buvo sumaišyti 5 skirtingų sudėčių mišiniai. Kiekviename mišinyje buvo atitinkamai kiekiais 0%, 5%, 10%, 15%, 20% pakeista dalis cemento dolomito mineralais. Apačioje 4 lentelėje pateiktos mišinių sudėtys:

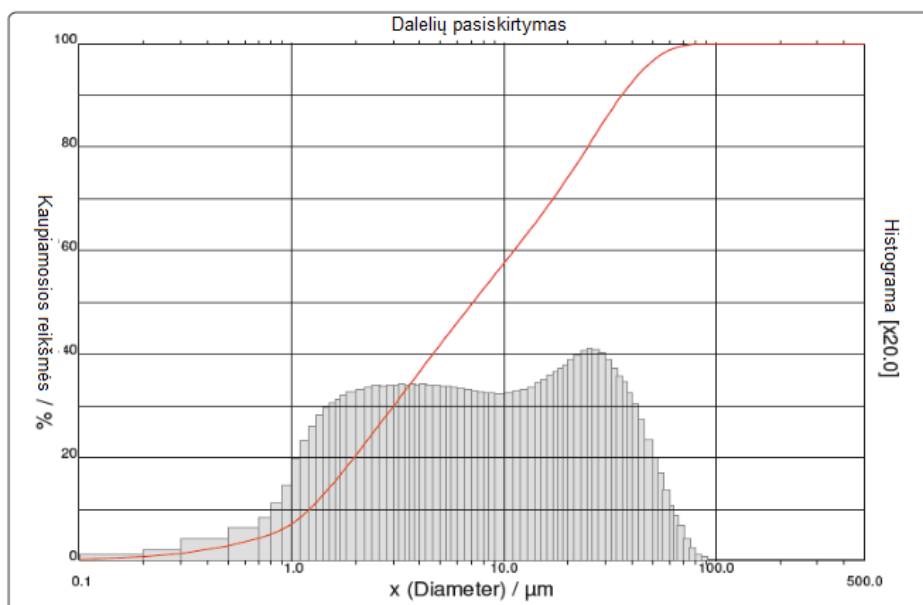
4 lentelė. Bandinių sudėtys

Sudėties Nr.	Bandinių sudėtys				
	1 (0%)	2 (5%)	3 (10%)	4 (15%)	5 (20%)
Cementas, kg CEM I 42.5 N	370	351.5	333	314.5	296
Smėlis fr.0/4, kg	1700	1700	1700	1700	1700
Vanduo, kg	227.8	227.8	227.8	227.8	227.8
Maltas dolomitas, kg	0	18.5	37	55.5	74

Buvo ištirtos cemento ir dolomito granulometrijos. Bandyme naudoto cemento ir dolomito smulkumai pateikti 10 ir 11 pav. Iš diagramų matoma, kad dolomitui esant sumaltam iki 65 μm susidaro daugiausiai smulkių dalelių, kai tuo tarpu cementui esant 38 μm dalelių dydžio. Kadangi smulkinto dolomito dalelių smulkumas siekia net 65 μm ir smulkiųjų dalelių kiekis didesnis negu cemento, tai gali pagerinti betono savybes tokias kaip nepralaidumas vandeniui, chlorido jonų pralaidumo sumažėjimas, betono poringumas, pagerėti plyšio betone savaiminis užsitaisymas ir kt.



10 pav. Malto dolomito miltelių dalelių pasiskirstymas pagal dydį.



11 pav. Cemento dalelių pasiskirstymas pagal dydį.

Buvo padaryti prizmelės formos bandiniai 40x40x160mm matmenų pagal LST EN-196-1 standartą. Bandiniams sukietėjus buvo apskaičiuotos jų deformacijos po 1 ir 3 parų bei po 7 ir 28 parų. Taip pat apskaičiuotas bandinių lenkiamasis ir gniuždomasis stipris po 7 ir 28 parų.

2.2. Betono prizmelių su dolomitu ir kristaliniu priedu gniuždomojo stiprumo ir deformacijų nustatymas

Antrame tyrime buvo tiriami bandiniai su papildomais priedais, tokiais kaip dolomitas ir kristaliniai priedai. Kaip kristalinis priedas buvo naudojama medžiaga Betocrete CP-360 WP. Buvo padarytos penkios skirtingos betono mišinio sudėtys analogiškos pirmam tyrimui, tačiau į visus bandinius buvo įdėta po 1% kristalinio priedo nuo bendros cemento ir dolomito masės. Bandiniai buvo maišomi ir formuojami pagal LST EN-196-1 standartą. Bandymų metu buvo stebimas priedų poveikis betono stiprumui ir susitraukimui. Bandinių deformacijos buvo matuojamos po 1 ir 3 parų bei 7 ir 28 parų, bandinių gniuždomasis bei lenkiamasis stiprumas buvo matuojamas po 7 ir 28 parų. Bandiniai, kurių buvo skaičiuojamos stiprumo savybės, kietėjo vandenyje kur patalpos temperatūra yra 22 °C, o oro drėgnis 60% Bandiniai, kuriems buvo matuojamas susitraukimas, kietėjo tokiais pačiomis sąlygomis tik ore. Žemiau pateikta 5 lentelė kokiomis proporcijomis buvo maišomos medžiagos.

5 lentelė. Medžiagų kiekiai bandiniuose.

Medžiagos kiekis bandinyje					
Sudėties Nr.	1K (0%)	2K (5%)	3K (10%)	4K (15%)	5K (20%)
Cementas CEM I 42.5 N, kg	370	351.5	333	314.5	296
Smėlis fr.0/4, kg	1700	1700	1700	1700	1700
Vanduo, g	227.8	227.8	227.8	227.8	227.8
Maltas dolomitas	0	18.5	37	55.5	74
Betocrete CP-360 WP, kg	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7

2.3. Betono kubelių su dolomitu ir kristaliniu priedu gniuždomojo stiprumo nustatymas

Trečiam tyrimui stiprumo bandymams buvo suformuoti 100x100x100mm matmenų kubeliai, kurie buvo gniuždomi po 1, 3, 7, 28 parų ir 3 mėnesių. Plyšio užsitaisymo bandymams daryti buvo suformuoti 150x150x150mm matmenų kubeliai. Chlorido jonų prasiskverbimo bandymams buvo suformuoti 100mm diametro cilindro formos bandiniai. Visi bandiniai buvo palikti kietėti vandenyje, kur aplinkos temperatūra buvo 22 °C, o oro drėgnis 60%. Kadangi 1 ir 2 tyrime bandiniai su 10% dolomito mineralų pasižymėjo geriausiomis savybėmis, trečiame tyrime buvo taip pat keičiama 10% cemento dolomitu. Dar vienuose bandiniuose buvo pakeista 20% cemento dolomitu. Betono mišiniai buvo sumaišyti pagal 4 skirtingas sudėtis, kurios pateiktos 6 lentelėje.

6 lentelė. Bandinių mišinių sudėtys.

Medžiagų santykis bandinyje (vienam kubui)				
Sudėtis nr.	K	KP	KPD10	KPD20
Cementas CEM I 42.5 N , kg.	350	350	315	280
Smėlis fr. 0/4, kg	890	890	890	890
Žvirgždas fr. 4/16, kg	990	990	990	990
Vanduo, kg	157.5	157.5	157.5	157.5
Superplastiklis ViscoCrete D-187, kg	3.5	3.5	3.5	3.5
Betocrete CP-360 WP, kg	-	2.8	2.8	2.8
Maltas dolomitas, kg	-	-	35	70

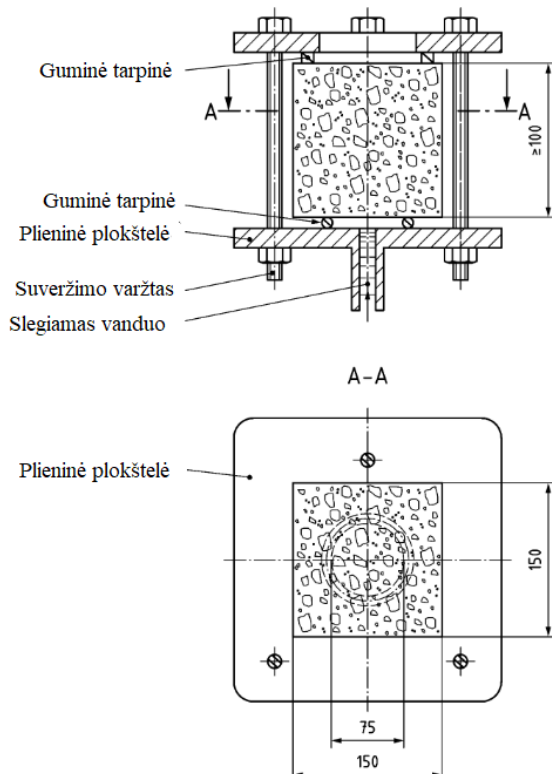
2.4. Vandens įsiskverbimo gylį veikiančiam slėgiui bandymas

Bandiniais K, KP, KPD10, KPD20 buvo tirti nustatant vandens įsiskverbimo gylį veikiančiam slėgiui pagal LST EN 12390-8 standartą. Atliekant tyrimą buvo norima nustatyti kristalinių priedų įtaką vandens prasiskverbimui betone. Tyrimui buvo naudojami 150 mm aukščio betono bandiniai, po 90 parų kietėjimo. Prieš atliekant bandymą bandiniai 1 parą buvo išlaikyti orasausėje laboratorijos aplinkoje, o bandymui atlikti buvo naudojamas bandymo stendas matomas 14 pav. Iš kurio galima matyti, kad atliekant bandymą vandens slėgis veikia bandinį iš apačios 500 kPa slėgiu su 50 kPa paklaida 3 paras.

Praėjus 72 h nuo bandymo pradžios bandiniai buvo išimti iš bandymo stendo ir perskelti pusiau išilgai bandymo metu besiskverbiamam vandeniui. 13 pav. pateikta bandymo schema ir matoma vandens skverbimosi kryptis. Perskėlus bandinius nebuvo pastebėtas vandens prasiskverbimas, todėl bandymas buvo kartojamas tokiomis pačiomis sąlygomis, išskyrus bandymo metu naudotą slėgį, kuris buvo pakeistas į 1,2 MPa. Pakartojus bandymą ir vėliau perskėlus bandinį rezultatai buvo nustatyti liniuote 1 mm tikslumu išmatuojant giliausiai į bandinius prasiskverbusio vandens gylį.



14 pav. Vandens įsiskverbimo į betoną bandymo prietaisai.



13 pav. Vandens įsiskverbimo į betoną bandymo prietaisai



12 pav. Vandens prasiskverbimo gylis nustatymas

2.5. Chlorido jonų prasiskverbimo bandymas

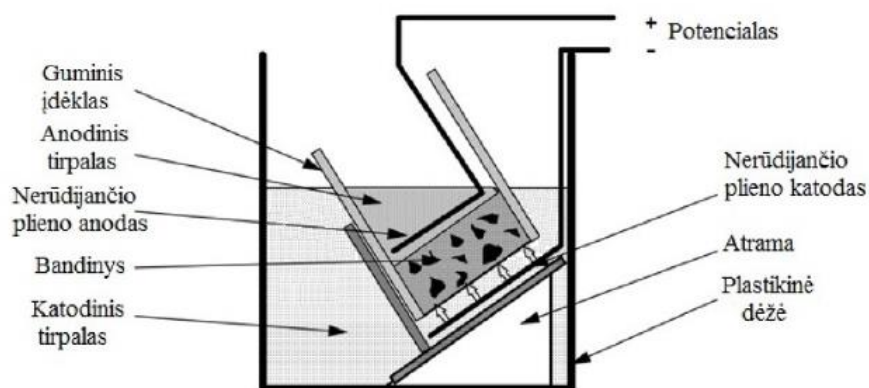
Chloridai migruodami į betoną sukelia betone esančios armatūros koroziją. Šiame bandyme buvo naudojama NT BUILD 492 metodika, padedanti nustatyti ir įvertinti chlorido jonų migraciją kapiliarais betone. Bandymo veikimo principas paremtas chloridų difuzijos skatinimu naudojant elektros srovės potencialą. Chlorido prasiskverbimo bandymo esmė: prie bandinio paviršiaus pridedami elektrodai, kurie sukelia chlorido jonų migraciją iš druskos tirpalo į betoną. Šis metodas yra pagrįstas Nernst'o ir Planck'o lygtimi darant prielaidą kad betonai, kuriame vyksta chloridų difuzija, yra homogeniška terpė.

Pagal standartinę chlorido jonų prasiskverbimo bandymų metodiką yra rekomenduojama naudoti cilindro formos bandinius, todėl bandymui buvo paruošti cilindro formos 100 mm diametro pagrindai, iš kurių vėliau deimanto dulkėmis padengtu pjūklų buvo išpjauti 50 mm aukščio bandiniai. Bandiniai kietėjo vandenyje 90 parų ir prieš bandymą. Bandymui taip pat buvo reikalingos kitos medžiagos tokios kaip: katodinis tirpalas NaCl (900g distiliuoto vandens ir 100g NaCl), anodinis tirpalas (12g NaOH vienam litrui distiliuoto vandens), sidabro nitratas (AgNO_3). Taip pat buvo naudojamas reguliuojamas elektros maitinimo šaltinis Voltcraft vlp-2403, kuris gali tiekti iki 40 V elektros srovę 0,1 V tikslumu, o elektros srovės stiprį tiekti iki 3 A su 0,01 A tikslumu (15 pav.).



15 pav. Elektros srovės šaltinis Voltcraft vlp-2403

Katodinis tirpalas NaCl buvo supiltas į didesnę talpyklą, į kurią vėliau buvo įdėtas bandinys, išpraustas į gumą. Bandiniui ir guminiam apvadui sudarius talpyklą į ją buvo supiltas anodinis tirpalas su NaOH. Į katodinį tirpalą buvo dedamas neigiamas elektros potencialas, o į anodinį teigiamas. 16 pav. ir 17 pav. matoma kaip buvo sujungta įranga su bandiniais ir bandinio sujungimo schema.



16 pav. Bandinio sujungimo schema



17 pav. Bandinių sujungimas su prietaisu

Prietaise Voltcraft buvo nustatyta 30 V įtampa ir gautas 80 mA bei 90 mA srovės stiprumas. Bandiniai buvo palikti 24 h, tuo tarpu kai tarp katodo ir anodo veikiant elektriniam laukui buvo leidžiama chlorido jonams judėti pro bandinį. Praėjus 24 h prietaisas buvo išjungiamas, o bandiniai buvo perskeliami išilgai chloridų judėjimo krypties. Perskelti bandiniai buvo apipurškiami sidabro nitratu (AgNO_3), kuris sureaguodamas su chloru veikė kaip indikatorius išryškindamas chlorido jonų pėdsakus.

Chlorido jonų koeficiento apskaičiavimo formulė:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \times \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (1)$$

D_{nssm} – chloridų difuzijos koeficientas, $\times 10^{-12}$ m²/s; U – įtampos vertė, V; T – anodinio tirpalo, pradinės ir galutinės temperatūros vidurkis, °C; L – bandinio storis, mm; x_d – chloridų penetracijos gylis betone, mm; t – bandymo trukmė, h.

2.6. Vandens įgerties ir atsparumo šalčiui pagal poringumą nustatymas betone

Šiame bandyme buvo vertinamas betono atsparumas šalčiui pagal poringumą. Bandymui atlikti buvo naudojami bandiniai iš trečio tyrimo su indeksais K, KP, KPD10, KPD20. Kiekvienai skirtingai bandinio sudėčiai tirti buvo naudojama po keturis bandinius. Bandymo pagrindą sudaro sausų bandinių pasvėrimas ir vandens įgerties nustatymas po 15 min., 1 valandos, 24 valandų, 48 valandų, bandinio masės nustatymas vandenyje. Bandymas buvo atliktas remiantis GOST 12730.4-78 standarte pateikta metodika, pagal kurią galima prognozuoti betono atsparumą šalčiui pagal betono šalčiui atsparumo kriterijų K_s , kuris išreiškiamas formule:

$$K_s = \frac{P_u}{0,09Pa}, \quad (2)$$

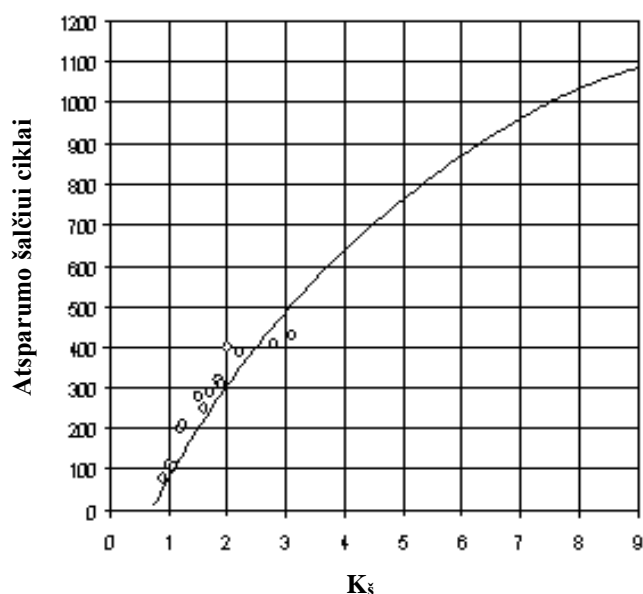
čia: P_u - uždaras betono poringumas (įtrauktas oras betono mišinyje ir kontrakcinės poros);

P_a - atviras integralinis betono poringumas (kapiliarinės poros);

P_u , - kuris apytiksliai lygus oro kiekiui betono mišinyje ir P_a , randami eksperimentiškai pagal rusų mokslininko Šeikino pateiktas metodikas.

Iš formulės 2 išraiškos matoma, kad betono atsparumas šalčiui yra priklausomas nuo betono atviro poringumo, kurį nulemia vandens ir cemento santykis, bei oro kiekio betone, kurį atitinka uždaras poringumas betone. Didinant įtraukto oro kiekį betono mišinyje, didėja betono atsparumas šalčiui. Tai patvirtina daugelis skirtingų autorių atliktų eksperimentų.

Remiantis šiuo atsparumo šalčiui kriterijumi betonas yra laikomas šalčiui atsparus, kuriame rezervinių porų tūris didesnis už vandens, esančio betono porose, tūrio prieaugį, virstant jam ledu. Eksperimentais yra nustatyta betono atsparumo šalčiui ciklų skaičiaus priklausomybė nuo įtraukto oro kiekio. Bendroji šios priklausomybės išraiška pateikta 18 pav.



18 pav. Betono atsparumo šalčiui priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus K_s

2.7. Vandens kapiliarinės įgerties matavimas per plyšį prieš ir po jo užsitaisymo betone su šlako priedu

Šio bandymo tikslas yra išmatuoti kapiliarinę įgertį į betoną pro plyšį prieš jam užsitaisant ir po užsitaisymo, lyginant įprastą betoną su betonu, kuris turi šlako priemaišų. Žemiau pateiktoje 7 lentelėje matomos kontrolinių ir savaime atsinaujinančių bandinių su šlaku sudėtys:

7 lentelė. Bandinių sudėtys.

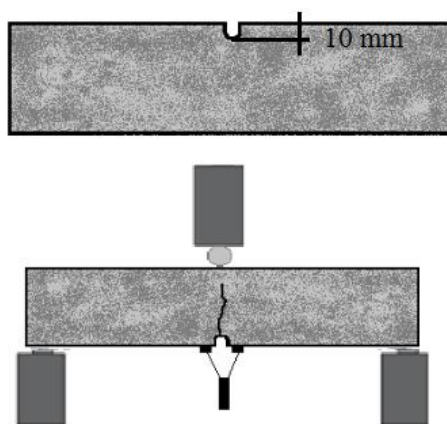
Kg/m^3	Kontroliniai band.	Savaime atsinaujinantys band.
Cementas I 42.5 N	300	240
Vanduo	165	165
Dolomito smėlis 0-8 mm	975	975
Dolimoto skalda 8-16 mm	975	975
Plieninės fibros	30	30
Superplastiklis Sika 5780	3 l/m ³	3-3.5 l/m ³
Aukštakrosnių šlakas	-	60

Bandymui naudoto šlako cheminė sudėtis 8 lentelėje:

8 lentelė. Šlako cheminė sudėtis.

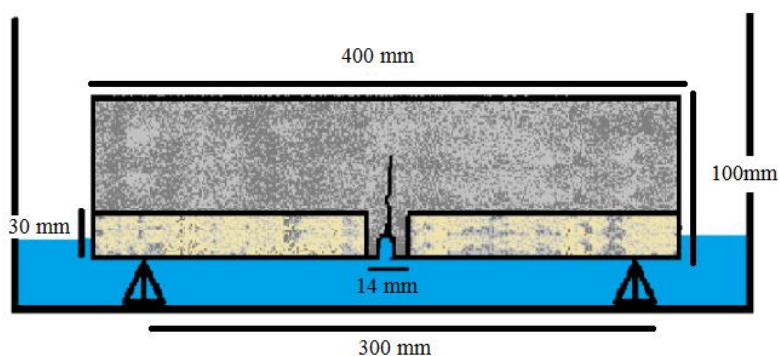
Medžiaga	Cheminė šlako sudėtis %							
	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	MgO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)
Aukštakrosnių šlakas	6,33	35,48	0,45	0,29	5,36	48,88	1,11	1,99

Pagal pateiktas sudėtis buvo suformuoti prizmės formos 100x100x400 mm matmenų bandiniai. Buvo suformuota po 6 prizmes kontroliniams bandiniams ir bandiniams su šlako priedu. Suformuoti bandiniai po paros išimti iš formų buvo įdedami į režiminę kamerą, kurioje buvo 95±5% santykinis drėgnumas ir 20°C temperatūra. Tokioje kameros aplinkoje bandiniai buvo laikomi 28 paras. Po 28 parų laiko bandiniai buvo išimti iš režiminės kameros ir paruošiami bandymui. Bandiniuose buvo padaroma 10 mm gylio įpjova ir pats bandinys buvo lenkiamas trijų taškų lenkimo metodika (20 pav.).



19 pav. Plyšio atvėrimo principinė schema

Bandinius lenkiant 1 mμ/s greičiu bandinyje buvo atveriamas plyšis, kurio plotis po lenkimo turėjo likti $0,2 \pm 0,05$ mm pločio. Po plyšių atvėrimo bandiniai buvo hidroizoliuoti įpjovos paviršiuje ir 30mm į kraštus. Buvo paliktas tik 14 mm nehidroizoliuotas tarpas aplink plyšį (19 pav.). Hidroizoliavus bandinius, bandiniai buvo džiovinami 40°C iki kol masės pokytis per 2 valandas neviršijo 0,2%. Išdžiovinti bandiniai buvo pasveriami sausi ir tada įmerkiami į vandenį tam tikrais laiko intervalais ne daugiau 5 mm juo pamerkiant gylin taip, kad vanduo galėtų į bandinį patekti tik pro plyšį. Kiekvieną kartą įmerkiant ir ištraukiant bandinį jis buvo pasveriamas ir nustatomas įgerto vandens kiekis. Atlikus pirmą matavimą bandiniai buvo įmerkiami į vandenį 30 parų. Po 30 parų bandiniai buvo džiovinami ir matuojamas įgerto vandens kiekis tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir pirmą kartą.



20 pav. Bandinio vandens įgerties matavimo principinė schema

Plyšio betono bandinyje užsitaismo koeficiento apskaičiavimas:

$$SE = \frac{SC_{neužsitaistes} \cdot SC_{užsitaistes}}{SC_{neužsitaistes} \cdot SC_{be\ plyšio}} \times 100\% \quad (3)$$

SE – plyšio užsitaismo koeficientas

$SC_{neužsitaistes}$ – kapiliarinės įgerties koeficientas bandiniui su neužsitaissiu plyšiu

$SC_{užsitaistes}$ – kapiliarinės įgerties koeficientas bandiniui su užsitaissiu plyšiu

$SC_{be\ plyšio}$ – kapiliarinės įgerties koeficientas bandiniui be atverto plyšio

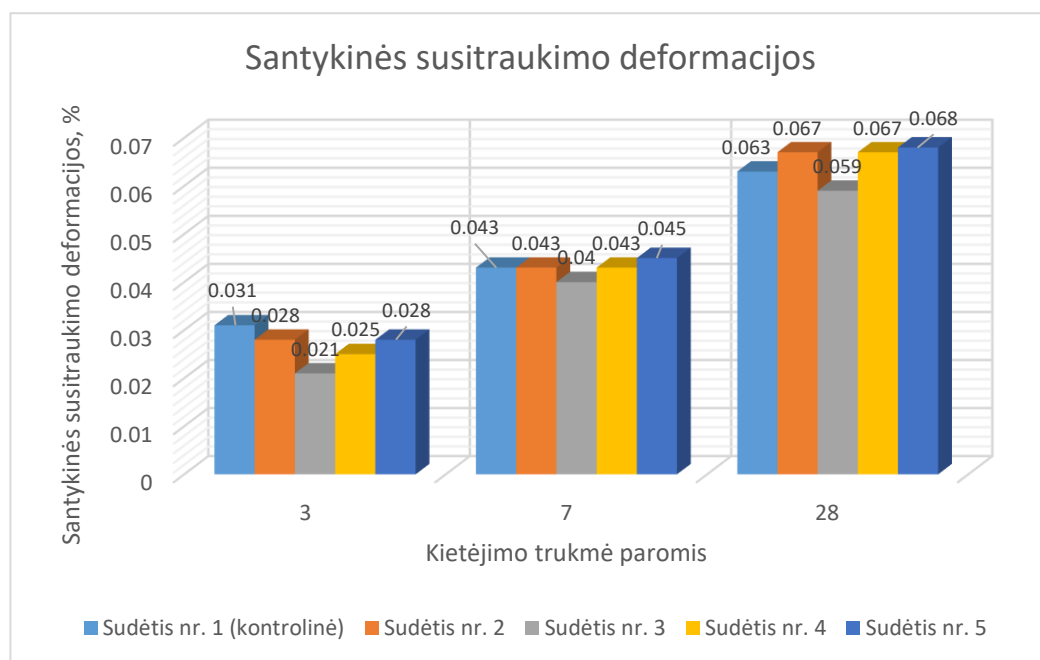
3. Rezultatai ir diskusija

3.1. Pirmas tyrimas. Gniuždomojo ir lenkiamojo stiprumo ir santykinų deformacijų nustatymas kai mišinyje naudojamas dolomitas.

Iš 9 lentelės matoma, kad bandiniai, kuriuose buvo pakeista 10% cemento dolomitu po 3 parų mažiausiai susitraukė 0,021%, lyginant su kitais bandiniais. Tarpe nuo 3 iki parų 7 visų bandinių susitraukimas buvo labai panašus apie 0,043%. Po 28 parų kietėjimo susitraukimas bandinių buvo panašus, bandiniai iš 3 sudėties pasižymėjo mažiausiu susitraukimu, kuris buvo lygus 0,059%.

9 lentelė. Bandinių deformacijos.

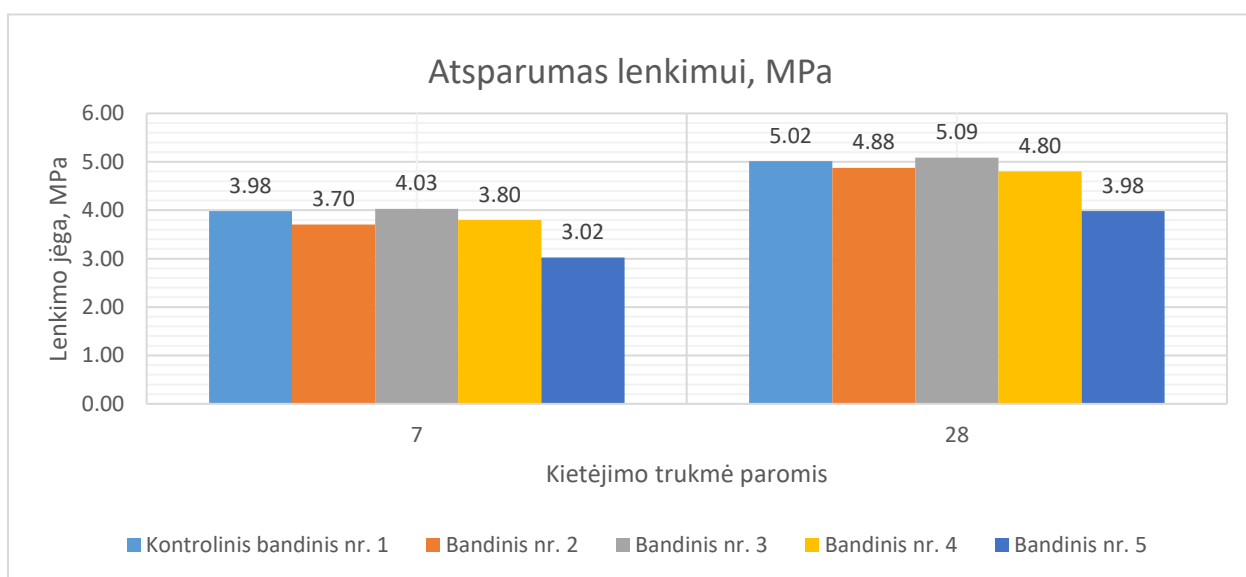
Sudėties nr.	Deformacijos, mm			
	Po paros	Po 3 parų	Po 7 parų	Po 28 parų
1	8,162	8,112	8,093	8,062
2	4,246	4,202	4,177	4,139
3	8,297	8,263	8,233	8,203
4	8,078	8,038	8,009	7,970
5	7,676	7,632	7,604	7,568



21 pav. Santykinės susitraukimo deformacijos.

10 lentelė. Atsparumo lenkimui rezultatai.

Lenkimo jėgos atsparumas, MPa		
Sudėties nr.	R1, Po 7 parų	R1, Po 28 parų
1	3,98	5.02
2	3,7	4,88
3	4,03	5,09
4	3,8	4,8
5	3,02	3,98

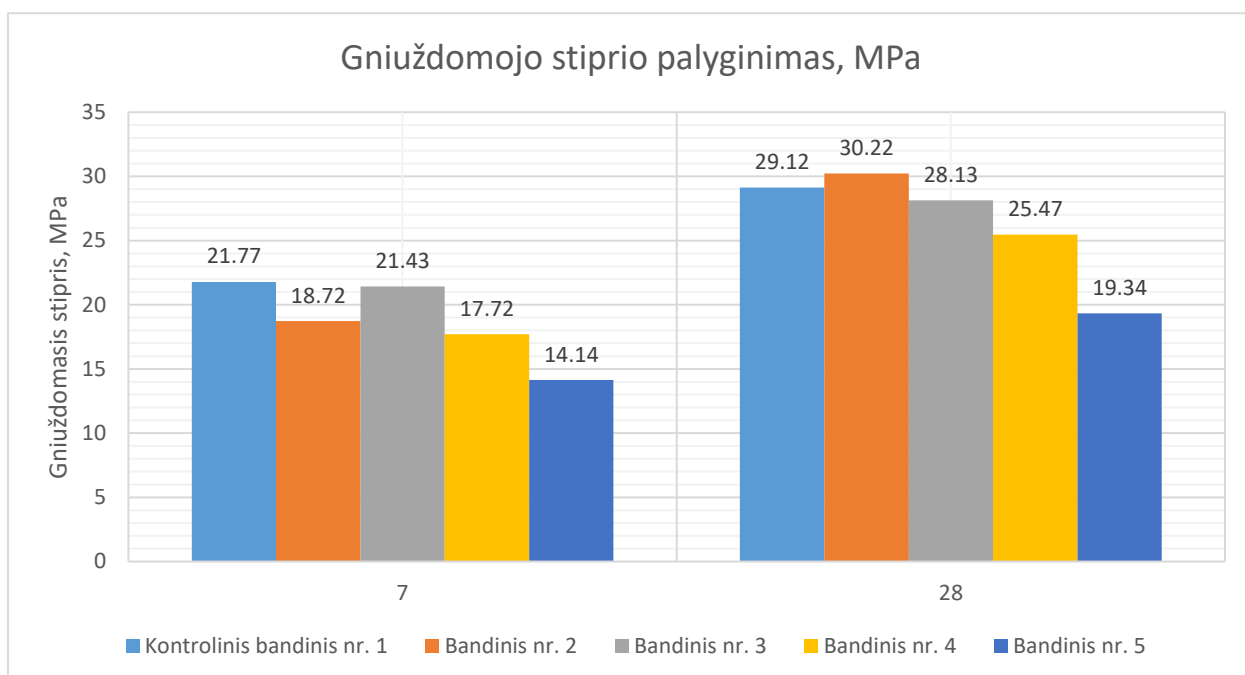


22 pav. Bandinių atsparumas lenkimui.

Iš 22 pav. diagramos matoma, kad bandinys nr.3 po savaitės laiko kietėjimo vandenyje patalpose, kuriose temperatūra buvo 22 °C, įgijo 1,25% didesnę lenkiamąją stiprį. Po 28 parų kietėjimo tokiomis pačiomis sąlygomis bandinys nr.3 turėjo 1,4% didesnę atsparumą lenkimui lyginant su kontroliniu bandiniu.

11 lentelė. Gniuždimo jėgos atsparis.

Gniuždimo jėgos atsparis, Mpa		
Sudėties nr.	Po 7 parų	Po 28 parų
1	21,77	29,12
2	18,72	30,22
3	21,43	28,13
4	17,72	25,47
5	14,14	19,34



23 pav. . Gniuždomojo stiprumo palyginimas.

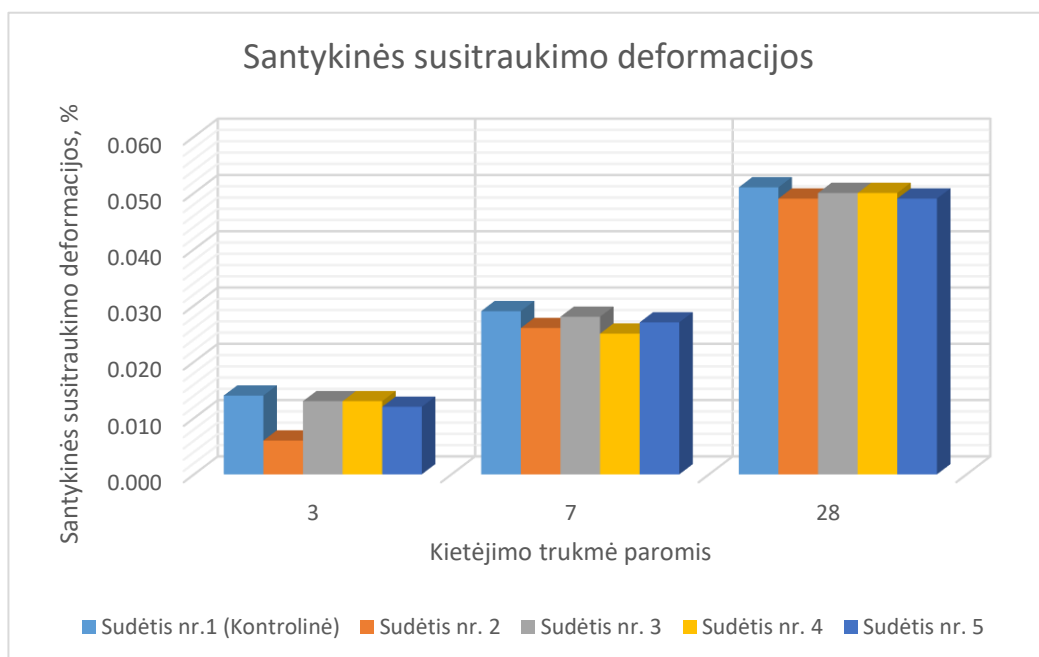
Iš 23 pav. grafiko matoma, kad kontrolinis bandinys po 7 parų kietėjimo vandenyje, kur patalpos temperatūra buvo 22°C, įgijo didžiausią gniuždomąjį stiprį iš visų bandinių, tačiau bandinys, kuriame buvo pakeista 10% cemento dolomitu, įgijo tik 1,568% mažesnę stiprį negu kontrolinis bandinys. Po 28 parų kietėjimo bandinys su 5% dolomito įgijo 3,77% didesnę gniuždomąjį stiprį negu kontrolinis, o bandinys su 10% dolomito įgijo 3,39% mažesnę gniuždomąjį stiprį.

3.2. Antras tyrimas. Gniuždomojo ir lenkiamojo stiprumo ir santykinų deformacijų nustatymas kai mišinyje naudojamas dolomitas ir kristalinis priedas Betocrete CP-360 WP.

Iš žemiau pateikto grafiko 24 pav. matoma, kad pakeitus cemento 5% dolomitu bandinys ankstyvojoje kietėjimo stadijoje susitraukė mažiausiai: jo santykinė susitraukimo deformacija lygi 0,006 %. Po 7 ir 28 parų kietėjimo vandenyje bandinių susitraukimo deformacijų skirtumas svyruoja 0,002% intervale.

12 lentelė. Bandinių deformacijos.

Sudėties nr.	Deformacijos, mm			
	Po paros	Po 3 parų	Po 7 parų	Po 28 parų
1K	8,269	8,247	8,222	8,188
2K	6,145	6,136	6,103	6,066
3K	8,238	8,218	8,193	8,154
4K	5,676	5,655	5,636	5,596
5K	8,237	8,218	8,194	8,159

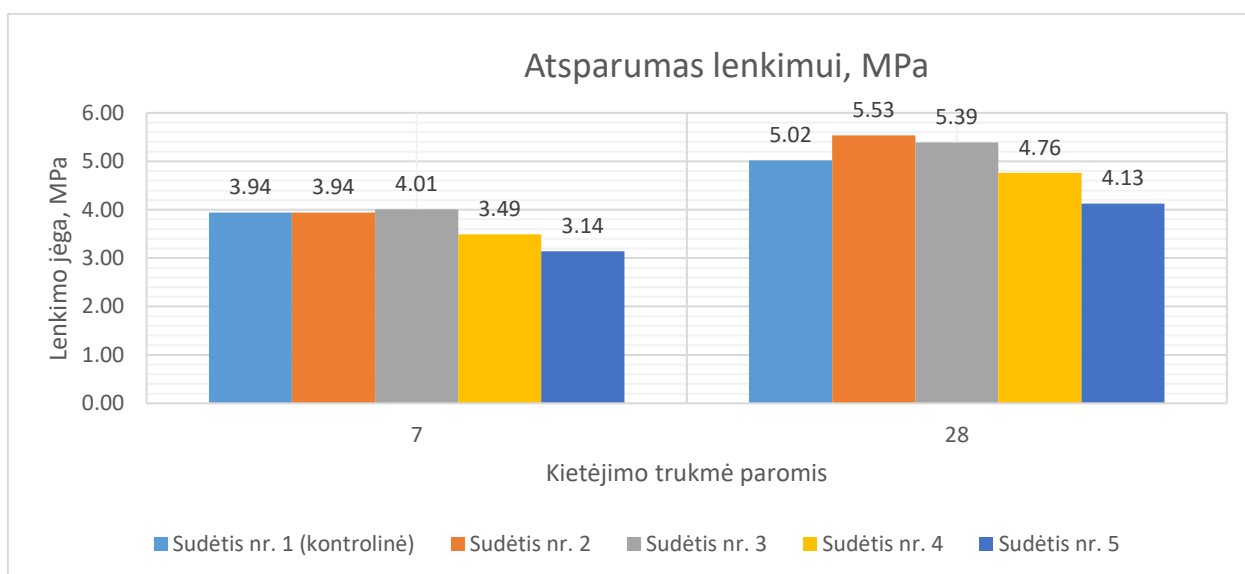


24 pav. Santykinės susitraukimo deformacijos.

Žemiau (13 lentelėje) pateikti lenkiamojo stiprio bandymų rezultatai:

13 lentelė. Atsparumo lenkimui rezultatai.

Lenkimo jėgos atsparis, MPa		
Sudėties nr.	Po 7 parų	Po 28 parų
1K	3,94	5,02
2K	3,94	5,53
3K	4,01	5,39
4K	3,49	4,76
5K	3,14	4,13

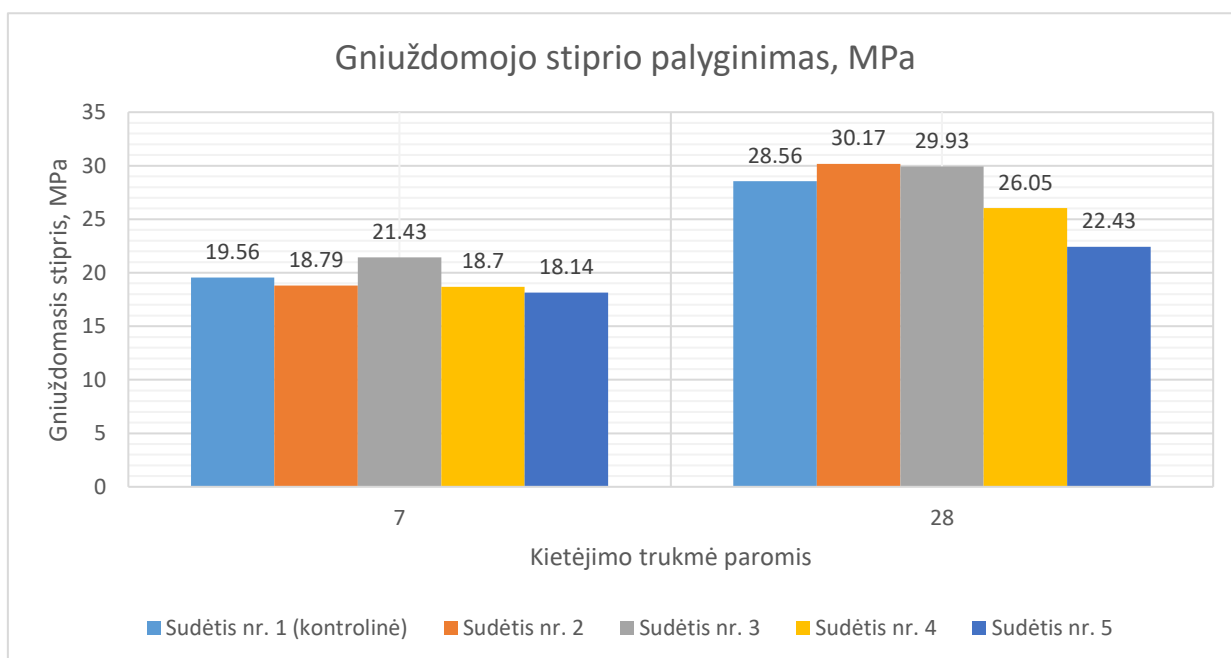


25 pav. Atsparumo lenkimui palyginimas.

Iš diagramos 25 pav. matome, kad bandinys nr.3 po 7 parų kietėjimo vandenyje įgijo 1,7% didesnę lenkiamąją stiprį negu kontrolinis bandinys. Po 28 parų kietėjimo vandenyje didžiausią lenkiamąją stiprį įgijo bandinys nr.2, kurio atsparumas lenkimui buvo 10,2 % didesnis už kontrolinio bandinio. Bandinys nr.3 įgijo 7,4 % didesnę lenkiamąją stiprį negu kontrolinis bandinis.

14 lentelė. Gniuždymo jėgos atsparis.

Gniuždymo jėgos atsparis, Mpa		
Sudėties nr.	Po 7 parų	Po 28 parų
1K	19,56	28,56
2K	18,79	30,17
3K	21,43	29,93
4K	18,7	26,05
5K	18,14	22,43



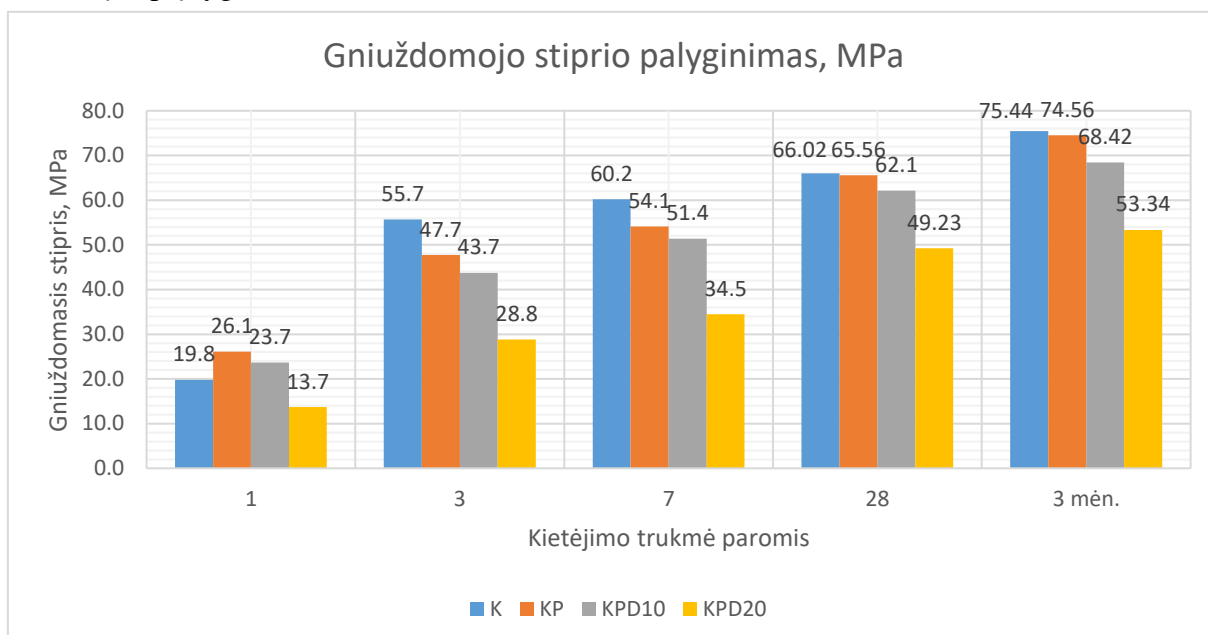
26 pav. Gniuždomojo stiprumo palyginimas.

Iš viršuje pateiktos 26 pav. diagramos matome, kad bandinys nr.3 po 7 parų kietėjimo vandenyje įgijo 9,56% didesnę gniuždomąją stiprį negu kontrolinis bandinis. Po 28 parų kietėjimo bandinys nr.2 įgijo 5,63% didesnę gniuždomąją stiprį, o bandinys nr.3 - 4,8% didesnę stiprį lyginant su kontroliniu bandiniu.

3.3. Trečias tyrimas. Betono su kristaliniais priedais stiprumo nustatymas po 3, 7, 28, 90 parų

Iš grafiko 27 pav. matoma, kad KPD10 sudėties bandiniai po paros laiko įgijo 19,6% didesnę gniuždomąją stiprį lyginant su pirmąja bandinių sudėtimi. Po 3 parų kietėjimo vandenyje kontrolinė sudėtis K įgijo didžiausią stiprį, o bandiniai KPD10 ir KPD20 įgijo 21,5% ir 48,3% atitinkamai mažesnę stiprį. Po 7 parų kietėjimo bandinių KPD10 ir KPD20 stipriai buvo atitinkamai mažesni 14,61% ir 42,7%. Po 28 parų didžiausią stiprį įgijo kontroliniai bandiniai K, o bandiniai KPD10

įgijo 6,3 % mažesnę stiprį ir atitinkamai KPD10 bandinys po 3 mėn. kietėjimo trukmės įgijo 10,26% mažesnę stiprį lyginant su kontroliniu bandiniu.



27 pav. Gniuždomojo stiprumo palyginimas

3.4. Ketvirtas tyrimas. Vandens įsiskverbimo gylio nustatymas veikiant slėgiui

Perskėlus visus bandinius buvo išmatuotas maksimalus vandens įsiskverbimo gylis ir gauti tokie rezultatai, pavaizduoti 15 lentelėje:

15 lentelė. Vandens įsiskverbimo rezultatai.

Sudėtis:	Maksimalus įsiskverbimo gylis (mm)
K	13
KP	7
KPD10	10,8
KPD20	13,5

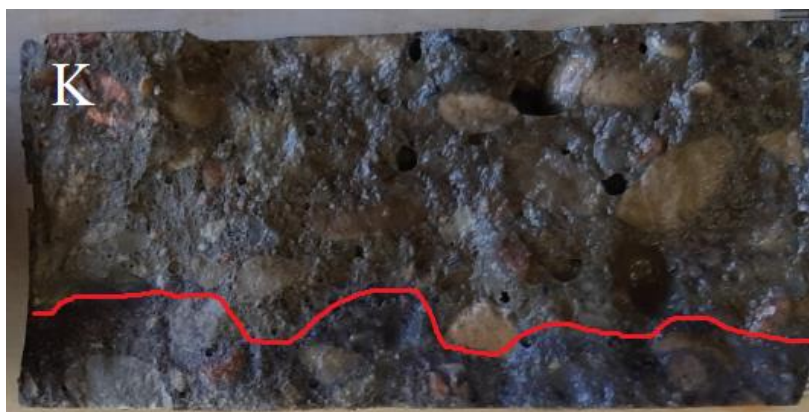
Pagal gautus rezultatus matoma, kad vandens įsiskverbimo gylis svyruoja nuo 7 mm iki 13,5 mm, todėl betoną galima laikyti vandeniui nelaidžiu. Pagal LST EN 12390-8, betonas yra nelaidus vandeniui, kai vandens ir cemento santykis neviršija 0,6 ir cemento kiekis ne mažesnis kaip 280 kg/m³; vidutinis vandens įsiskverbimo į jį gylis bandant ne mažiau kaip trijų ėmimų bandinius turi būti mažesnis kaip 20 mm, o didžiausias vandens įsiskverbimo gylis turi neviršyti 50 mm. Bandiniai KP su kristalizaciniu priedu pasižymėjo geriausiu nelaidumu vandeniui, kuris buvo 46,15% geresnis lyginant su kontroliniais bandiniais. Naudojant 10% dolomito, laidumas vandeniui buvo 16,9% mažesnis lyginant su kontroliniais bandiniais. Bandiniuose KPD10 ir KPD20 laidumas vandeniui padidėjo lyginant su bandiniais KP, todėl galima daryti išvadą, kad kuo daugiau naudojama dolomito miltelių, tuo bandiniai labiau yra laidus vandeniui.

3.5. Penktas tyrimas. Chlorido jonų prasiskverbimo bandymas

Atlikus bandymą buvo nustatytas ir apskaičiuotas chlorido jonų prasiskverbimo koeficientas. Kuo šis koeficientas yra mažesnis, tuo betonas yra laikomas geresniu, nes mažesnis koeficientas parodo mažesnę chlorido jonų pralaidumą. Šio koeficiento matavimo matas yra $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Bandymų rezultatai pateikti 16 lentelėje:

16 lentelė. Chlorido jonų prasiskverbimo koeficientai.

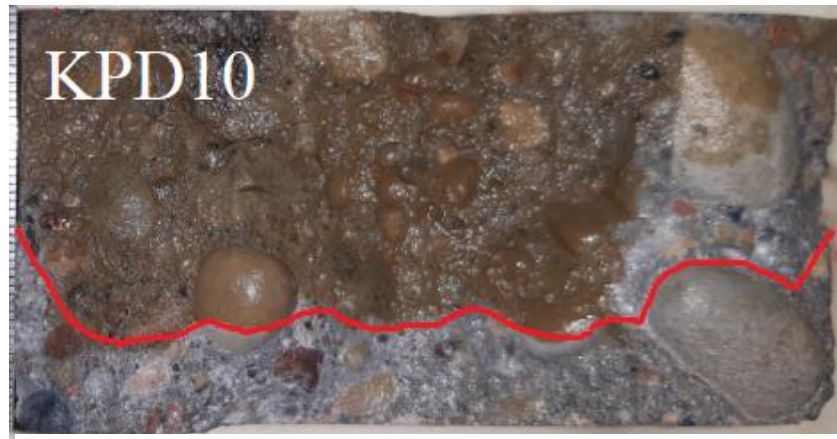
Bandinių nr.	D_{nssm} , ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
K	10,26
KP	6,85
KPD10	9,76
KPD20	17,46



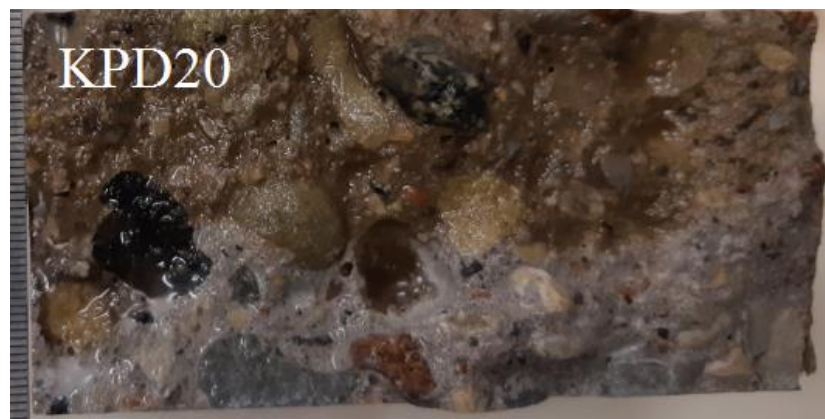
29 pav. Bandinys K



28 pav. Bandinys KP



31 pav. Bandinys KPD20



30 pav. Bandinys KPD10

Iš gautų rezultatų matoma, kad bandiniai KPD10 pasižymėjo mažiausiu chlorido jonų prasiskverbimo koeficientu, kuris mažesnis už kontrolinių bandinių net 33,2%.

3.6. Šeštasis tyrimas. Betono atsparumo šalčiui prognozavimas

Buvo išmatuota po 4 bandinius kiekvienai skirtingai sudėčiai. Matavimus apėmė sausų bandinių pasvėrimas bei vandens įgerties matavimas po tam tikro laiko ir bandinių svėrimas vandenyje. Atlikus matavimus iš bandinių duomenų buvo išvesti vidurkiai ir buvo apskaičiuoti kiti fizikiniai dydžiai, reikalingi prognozuoti betono atsparumą šalčiui, ciklais. Gauti rezultatai pateikti 17 lentelėje:

17 lentelė. Betono prognozuojamas atsparumas šalčiui

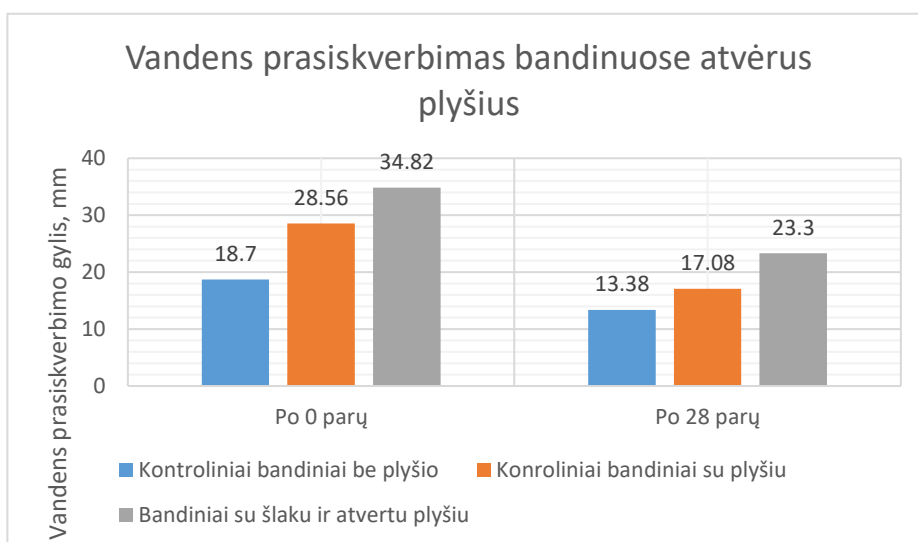
Bandinio Nr.	Bendras poringumas, %	Atviras poringumas, %	Uždaras poringumas, %	α	λ	Atsparumo šalčiui kriterijus, Kš	Prognozuojamas atsparumas šalčiui, ciklais
K	13,09	9,23	3,86	0,39	0,91	1,49	~201
KP	13,05	9,22	3,83	0,41	1,01	1,51	~204
KPD10	14,94	9,25	5,69	0,58	0,55	1,94	~298
KPD20	15,02	11,56	3,46	0,33	1,12	1,42	~184

Apibendrinant gautus rezultatus, matyti, kad vidutinių porų dydžio rodiklis λ kinta nuo 0,55 iki 1,01 ir yra mažesnis už vertę 1,50. Tai rodo kad visi bandiniai turi vidutinio didumo porų ir turi

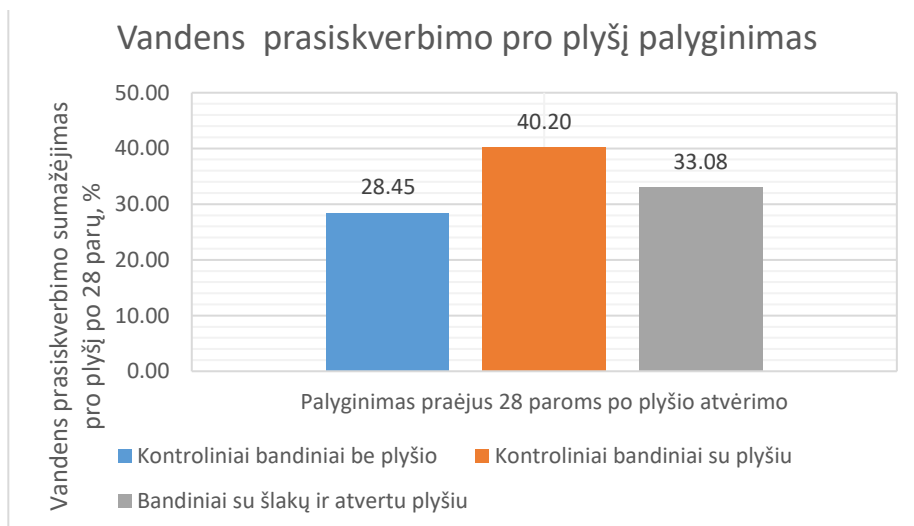
ganėtinai gerą atsparumą šalčiui. Tačiau bandinys KPD20, kurio $\lambda=0,55$, turi daugiausiai smulkių porų lyginant su kitais bandiniais, kas įtakoja šio bandinio 46,05% didesnę atsparumą šalčiui, ciklais, negu kontroliniai bandiniai. Porų pasiskirstymo pagal dydį rodiklis α kinta nuo 0,33 iki 0,58, kas rodo, kad bandiniuose yra skirtingas atvirų ir uždarų porų pasiskirstymas. Bandiniuose KPD10 uždarų porų kiekis yra 47,4% didesnis negu kontroliniuose bandiniuose. Kuo rodiklis α artimesnis 1,0, tuo betonas yra atsparesnis užšalimo ir atšilimo ciklams.

3.7. Vandens kapiliarinės įgerties matavimo per plyšį prieš ir po jo užsitaisymo betone su šlako priedu rezultatai

Atlikus bandymą buvo apskaičiuotas bandinių atsinaujinimo efektyvumas lyginant vandens įsiskverbimo gylį į bandinį milimetrais. Vandens prasiskverbimo gylio sumažėjimas buvo įvertintas procentais skaičiuojant į kokią gylį prasiskverbė vanduo po 0 parų ir 28 parų.



32 pav. Vandens prasiskverbimo bandiniuose atvėrus plyšį rezultatai



33 pav. Vandens prasiskverbimo sumažėjimas

Iš 33 pav. matoma, kad bandiniai su šlako priedu pasižymėjo mažesniu vandens prasiskverbimo sumažėjimo efektyvumu, tai yra 7,12% mažesniu lyginant su kontroliniu bandiniu. Tai parodo, kad naudojant aukštakrosnių šlaką, betono plyšiai užsiveria prasčiau negu nenaudojant tokių priedų.

Išvados

1. Bandiniai su kristaliniu priedu po 90 parų įgijo 1,18% mažesnę gniuždomąją stiprį lyginant su kontroliniais bandiniais, o bandiniai su kristaliniu priedu ir 10% cemento pakeistu dolomitu po 90 parų pasižymėjo 10,26% mažesniu gniuždomuoju stipriu.
2. Bandiniuose, kuriuose buvo keičiama 5%, 10%, 20% cemento dolomitu po 28 parų praktiškai nesiskyrė santykinės deformacijos, kurių reikšmė svyruoja 0,002% intervale.
3. Vandens prasiskverbimo bandymai veikiant 1,2 MPa slėgiui parodė, kad visi bandiniai yra nelaidūs vandeniui, tačiau lyginant kontrolinius bandinius, betonai su kristaliniu priedu buvo 33% mažiau nelaidūs vandeniui.
4. Chlorido jonų prasiskverbimo bandymu nustatyta, kad bandiniai su kristaliniu priedu be jokių kitų papildomų priemonių įgijo mažiausią chlorido jonų prasiskverbimo koeficientą, 33,23% mažesnę lyginant su kontroliniais bandiniais, kas parodo, kad toks betonai mažiau praleidžia chlorido jonų ir yra ilgaamžiškesnis.
5. Betono šalčio atsparumo prognozavimo metodika buvo nustatyta, kad betonai su kristaliniu priedu ir 10% cemento pakeistais dolomito milteliais pasižymėjo 44% geresniu atsparumu šalčiui, ciklais.
6. Kapiliarinės įgerties bandymo metu nustatyta, kad bandiniai su šlako priedu pasižymėjo 7,12% mažesnių kapiliarinės įgerties pro plyšį sumažėjimo efektyvumu lyginant su kontroliniais bandiniais.

Literatūros sąrašas

1. SEIFAN, M., et al. Mechanical Properties of Bio Self-Healing Concrete Containing Immobilized Bacteria with Iron Oxide Nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 20180325, May, 2018, vol. 102, no. 10. pp. 4489-4498 ISSN 1432-0614; 0175-7598.
2. XU, Jing. Wang, Xianzhi. *Biochemical Process of Ureolysis-Based Microbial CaCO₃ Precipitation and its Application in Self-Healing Concrete*. DOI - 10.1007/s00253-018-8779-x.
3. ZHANG, Wang. *A Binary Concrete Crack Self-Healing System Containing Oxygen-Releasing Tablet and Bacteria and its Ca²⁺-Precipitation Performance*. DOI - 10.1007/s00253-016-7741-z.
4. LUO, Qian. *Efficiency of Concrete Crack-Healing Based on Biological Carbonate Precipitation*. DOI - 10.1007/s11595-015-1304-5.
5. LUO, J., et al. *Interactions of Fungi with Concrete: Significant Importance for Bio-Based Self-Healing Concrete*. , 10 March 2018, 2018 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817326399> ISBN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.233>.
6. TAN, Noel. Peter, Bengzon. *Silica-Based Self-Healing Microcapsules for Self-Repair in Concrete*. DOI - 10.1002/app.43090.
7. ABD_ELMOATY, A.M. *Self-Healing of Polymer Modified Concrete*. , June 2011, 2011 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016811000391> ISBN 1110-0168. DOI <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.03.002>.
8. DE OLIVEIRA, Luiz. Antonio, Pereira. *Study of Sorptivity of Self-Compacting Concrete with Mineral Additives*. DOI - 10.1080/13923730.2006.9636395.
9. SAHMARAN, M., YILDIRIM, G. and ERDEM, T.K. *Self-Healing Capability of Cementitious Composites Incorporating Different Supplementary Cementitious Materials*. , January 2013, 2013 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946512001771> ISBN 0958-9465. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.013>.
10. SUKHOTSKAYA. *Effect of autogenous healing of concrete subjected to periodic freeze-thaw cycles*. ISBN - 1570-1468. DOI - 10.1007/BF01427180.
11. JIANG, Li. *Influence of Mineral Additives and Environmental Conditions on the Self-Healing Capabilities of Cementitious Materials*. ISBN - 0958-9465. DOI - <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.014>.
12. RESTUCCIA, Reggio. *New Self-Healing Techniques for Cement-Based Materials*. ISBN - 2452-3216. DOI - <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.016>.
13. QURESHI. *Autogenous Self-Healing of Cement with Expansive Minerals-I: Impact in Early Age Crack Healing*. DOI - 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.143.
14. RAMEZANIANPOUR. *Influence of Initial Steam Curing and Different Types of Mineral Additives on Mechanical and Durability Properties of Self-Compacting Concrete*. ISBN - 0950-0618. DOI - <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.072>.

15. KANELLOPOULOS, Petrou. *Durability Performance of Self-Compacting Concrete*. ISBN - 0950-0618. DOI - <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.049>.
16. ZHAO, Sun. *The Properties of the Self-Compacting Concrete with Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag Mineral Admixtures*. ISBN - 0959-6526. DOI - <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.050>.
17. WANG, Fang. *A Self-Healing Cementitious Composite with Mineral Admixtures and Built-in Carbonate*. ISBN - 0958-9465. DOI - <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.013>.
18. AL, Ansari. *Performance of Modified Self-Healing Concrete with Calcium Nitrate Microencapsulation*. ISBN - 0950-0618. DOI - <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.152>.
19. ROIG, Flores. *Self-Healing Capability of Concrete with Crystalline Admixtures in Different Environments*. ISBN - 0950-0618. DOI - <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091>.
20. JIANG, Z. *Self-Healing of Cracks in Concrete with various Crystalline Mineral Additives in Underground Environment*. DOI - 10.1007/s11595-014-1024-2.
21. REINHARDT. *Permeability and Self-Healing of Cracked Concrete as a Function of Temperature and Crack Width*. ISBN - 0008-8846. DOI - [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01099-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01099-2).
22. MANOJ, Kumaar. *Thermal Analysis on Self-Healing Concrete using Poly Vinyl Alcohol*. DOI - 10.1080/01430750.2018.1531260.

Priedai

1 lent. Pirmojo bandimo deformacijų skaičiavimo rezultatai

Deformacijos, mm				
Bandinio nr,	Po paros	Po 3 parų	Po savaitės	Po 28 parų
1	8,162	8,112	8,093	8,062
2	4,246	4,202	4,177	4,139
3	8,297	8,263	8,233	8,203
4	8,078	8,038	8,009	7,970
5	7,676	7,632	7,604	7,568

2 lent. Pirmojo bandimo gniuždimo jėgos matavimo rezultatai

Gniuždimo jėgos atsparis, Mpa		
Bandinio nr,	7	28
1	21,77	29,12
2	18,72	30,22
3	21,43	28,13
4	17,72	25,47
5	14,14	19,34

3 lent. Antrojo bandimo deformacijų skaičiavimo rezultatai

Deformacijos, mm				
Bandinio nr,	Po paros	Po 3 parų	Po savaitės	Po 28 parų
1K	8,269	8,247	8,222	8,188
2K	6,145	6,136	6,103	6,066
3K	8,238	8,218	8,193	8,158
4K	5,676	5,655	5,636	5,596
5K	8,237	8,218	8,194	8,159

4 lent. Antrojo bandimo gniuždimo jėgos matavimo rezultatai

Gniuždimo jėgos atsparis, Mpa		
Bandinio nr,	7	28
1K	19,56	28,56
2K	18,79	30,17
3K	21,43	29,93
4K	18,7	26,05
5K	18,14	22,43

5 lent. Trečiojo bandimo gniuždimo jėgos matavimo rezultatai

Gniuždomasis kubelių 100x100x100 stipris, Mpa					
Sudėties nr,	1	3	7	28	3 mėn,
K	19,8	55,7	60,2	66,02	75,44
KP	26,1	47,7	54,1	65,56	74,56
KPD10	23,7	43,7	51,4	62,1	68,42
KPD20	13,7	28,8	34,5	49,23	53,34

6 lent. Šeštojo įgerties nustatymo badimo rezultatai

	Įgerties bandymo rezultatai					
	Sausas	15in	1h	1 para	4 paros	Vandenyje
K-1	768,16	782,81	788,65	801,49	801,61	469,39
K-2	895,44	911,83	918,89	933,08	932,64	546,75
K-3	998,89	1013,33	1020,42	1033,31	1033,49	612,29
K-4	807,68	820,15	826,54	838,08	834,45	494,54
KP-1	340,04	348,97	352,18	355,46	355,60	210,03
KP-2	744,68	755,51	760,77	773,75	774,6	454,04
KP-3	975,77	987,93	993,68	1008,77	1009,59	694,57
KP-4	1007,28	1020,74	1027,38	1044,16	1044,7	615,24
KPD10-1	943,23	956,39	962,94	978,82	979,7	569,61
KPD10-2	1146,90	1161,75	1169,60	1191,01	1192,36	690,18
KPD10-3	925,90	938,70	945,53	961,63	962,56	558,31
KPD10-4	666,94	677,67	683,66	695,45	696,2	403,47
KPD20-1	926,32	942,41	951,69	969,8	970,65	566,53
KPD20-2	1068,04	1058,68	1095,94	1117,62	1118,78	651,13
KPD20-3	856,64	872,09	881,20	898,34	899,23	522,30
KPD20-4	1027,27	1043,7	1053,58	1074,02	1074,70	627,16

7 lent. Kapiliarinės įgerties pro plyšį bandimo rezultatai

Kapiliarinės įgerties skaičiavimas prieš plyšio užsitaisimą						
Laikas min	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5	Ref6
0	10012,6	10171,1	9690,6	10261,4	10092	9849,5
1	10014,5	10174,1	9692,6	10268,2	10102,1	9859,2
16	10015,4	10177,5	9695,5	10268,5	10101,8	9860,7
36	10016,1	10179,1	9697,4	10268,5	10101,8	9862,3
49	10015,8	10180,3	9698	10268,7	10101,8	9863,3
64	10017,2	10182,2	9699,7	10269,2	10102,1	9864,1
81	10081,1	10183,3	9700,8	10269,9	10102,1	9865,2
100	10017,5	10183,3	9701,1	10270,9	10104,4	9866,3
121	10018,2	10184,3	9702	10271,8	10104,5	9867,2
144	10019	10185,3	9702,8	10272,4	10104,7	9867,9
169	10019,2	10187	9704,2	10273,9	10105,5	9869,2
196	10019,2	10187	9704,2	10272,9	10105,5	9869,2
225	10020,4	10188,9	9706	10274,7	10107,5	9871,4
256	10020,6	10189,9	9706,6	10275,1	10108,7	9871,9
289	10018,8	10191,1	9707,4	10276,9	10109,9	9873,9
324	10021,5	10191,5	9708,1	10278,3	10111,2	9875,8
1444	10030,6	10209,9	9727,6	10291,1	10122,7	9893,4

8 lent. Kapiliarinės įgerties pro plyšį bandimo rezultatai

Kapiliarinės įgerties skaičiavimas prieš plyšio užsitaisimą						
Laikas min	Slag1	Slag2	Slag3	Slag4	Slag5	Slag6
0	10043,3	9862,9	9786,5	9819,8	9869,6	9977,3
1	10047,3	9867,9	9790,5	9821,1	9871,2	9984,3
16	10049,9	9868,3	9793,1	9823,7	9873,5	9981,9
36	10052,2	9873,4	9797,3	9827,7	9877,1	9986
49	10052,7	9873,4	9797,3	9827,7	9871,1	9986
64	10054	9875,4	9798,5	9828,6	9877,9	9987,8
81	10055,9	9877,7	9802	9831,2	9879,9	9988,7
100	10057	9880,3	9803	9832,1	9881,1	9990,8
121	10060,2	9883,6	9803,6	9832,8	9882,6	9992,7
144	10061,2	9883,6	9803,9	9833,8	9883,4	9993,6
169	10063,7	9885,6	9802,1	9835,7	9884,1	9995,5
196	10064,1	9888,7	9805,6	9836,9	9886,2	9997,3
225	10067,1	9892	9806,6	9838,3	9886,8	9998,8
256	10070,1	9894,5	9807,5	9839	9888,8	10000,4
289	10068,3	9893,4	9806,7	9837,9	9887,6	10001,3
324	10072,1	9896,2	9810	9841,1	9890,6	10002,6
1444	10096,6	9924,3	9827,9	9860,9	9913,5	10028,1

9 lent. Kapiliarinės įgerties pro plyšį bandimo rezultatai

Kapiliarinės įgerties skaičiavimas po 28 parų						
Laikas min	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5	Ref6
0	10129,3	10303,7	9805	10401,2	10232,2	9972,1
1	10130,9	10305,8	9807,5	10404,8	10235,1	9974,1
16	10131,9	10308,8	98110,1	10405,1	10236,3	9976
36	10134,1	10311,2	9811,3	10405,5	10238,4	9978,5
49	10135,1	10312,9	9813,2	10406,2	10238,7	9979,3
64	10135,4	10313,4	9813,6	10406,5	10239,2	9979,2
81	10135,7	10314,3	9814,2	10406,9	10239,2	9980,4
100	10136,5	10315,1	9815,6	10407	10240,1	9981
121	10137,2	10315,7	9816,2	10408,3	10241,1	9982,1
144	10137,4	10316,7	9817,2	10409,1	10242	9982,7
169	10137,7	10316,8	98117,6	10409,1	10242,4	9983,6
196	10137,9	10317,6	98118,7	10409,9	10243,1	9984,6
225	10138	10318,6	98190	10409,7	10243,1	9984,8
256	10138,2	10319,2	9819,4	10410,7	10244,6	9985,6
289	10138,4	10319,3	9819,5	10411,4	10245,2	9986,9
324	10138,9	10319,4	9820,6	10411,5	10245,8	9987,4
1444	10146,4	10327,3	9829,5	10418,5	10253,9	9995,6

10 lent. Kapiliarinės įgerties pro plyšį bandimo rezultatai

Kapiliarinės įgerties skaičiavimas po 28 parų						
Laikas min	Slag1	Slag2	Slag3	Slag4	Slag5	Slag6
0	10170,3	9981,2	9911,4	9951,2	9981,5	10090,5
1	10173,4	9983,7	9915,2	9953,6	9984,1	10100
16	10176	9988,1	9918	9956,8	9986,7	10102,7
36	10176,9	9989,2	9919,8	9958	9989,8	10105
49	101786	9989,8	9921,2	9959	9990,4	10105,6
64	10179,2	9991,1	9921,9	9959,8	9991,1	10107,1
81	10180	9991,3	9923	9960,4	9992,5	10107,9
100	10180,3	9992,4	9923,3	9961,2	9992,8	10108,2
121	1180,5	9993,5	9924,4	9962	9993,6	10109,7
144	10181,4	9993,8	9925,1	9963,1	9994,6	10110,4
169	10182,7	9993,9	9926,1	9963,4	9995,1	10111,1
196	10182,8	9994,7	9926,8	9964,4	9996	10112
225	10183,6	9995,4	9927,9	9965,7	9997,5	10112,9
256	10184,7	9996,9	9928,9	9966,5	9998,1	10114,1
289	10185,4	9997,7	9930,5	9967,1	9999,1	10116
324	10186	9998,6	9930,6	9968,4	10000,1	10116,4
1444	10196,6	10012,4	9941,8	9984,4	10013,7	10132,5