



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Kęstutis Barkauskas

**CEMENTINIO AKMENS SU SILICIO DIOKSIDO MIKRODULKIŲ
PRIEDU SAVYBIŲ TYRIMAI**

**THE INVESTIGATION ON THE PROPERTIES OF CEMENT STONE
WITH SILICA FUME**

Baigiamasis magistro darbas

Statybos medžiagų ir dirbinių studijų programa, valstybinis kodas 621J82001

Statybų technologijos studijų kryptis

Vilnius
2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Kęstutis Barkauskas

CEMENTINIO AKMENS SU SILICIO DIOKSIDO MIKRODULKIŲ
PRIEDU SAVYBIŲ TYRIMAI

THE INVESTIGATION ON THE PROPERTIES OF CEMENT STONE
WITH SILICA FUME

Baigiamasis magistro darbas

Statybos medžiagų ir dirbinių studijų programa, valstybinis kodas 621J82001

Statybų technologijos studijų kryptis

Vadovas

prof. D. Naigochius 2017 06 05
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Statybų technologijos studijų kryptis

Statybos medžiagos ir dirbiniai studijų programa, valstybinis kodas 621J82001

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Gintautas Skripkiūnas

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei) Kęstučiui Barkauskui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Cementinio akmens su silicio dioksido mikrodulkių priedu savybių tyrimai.....

patvirtinta 2017 m. kovo 3.d. dekanų potvarkiu Nr. 127 st.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2017 m. birželio 6 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Išanalizuoti lietuvių ir užsienio mokslinę literatūrą, susijusę su darbo tema. Išnagrinėti cementinio akmens struktūrą ir pagrindines savybes, tyrimų metodikas, pagal kurias nustatomi įvairūs mišinio ir sukietėjusio cementinio akmens parametrai. Išanalizuoti silicio dioksido mikrodulkių priedo poveikį cementinio akmens savybėms. Atlikti išsamią rezultatų analizę. Suformuluoti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo

konsultantai:

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

(Parašas)

..... prof. Džigita Nagrockienė.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

..... Kęstutis Barkauskas

(Vardas, pavardė)

(Data)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Kęstutis Barkauskas, 20044817

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statybos medžiagos ir dirbiniai, SMDfm-15

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. birželio 05 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Cementinio akmens su silicio dioksido mikrodulkių priedu savybių tyrimai“ patvirtintas 2017 m. kovo 15 d. dekanų potvarkiu Nr. 127st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas doc. dr. Džigita Nagrockienė.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).


(Parašas)

Kęstutis Barkauskas
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Statybinių medžiagų katedra		ISBN Egz. sk. Data-.....-.....	ISSN
Antrosios pakopos studijų Statybos medžiagų ir dirbinių programos magistro baigiamasis darbas Pavadinimas Cementinio akmens su silicio dioksido mikrodulkių priedu savybių tyrimai Autorius Kęstutis Barkauskas Vadovas Džigita Nagrockienė			
Kalba: lietuvių			
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos cementinio akmens savybės su silicio dioksido mikrodulkių priedu. Teorinėje dalyje atlikta literatūros analizė, pateiktos bendrosios žinios apie silicio dioksido mikrodulkes, cementinio akmens žaliavas. Darbe tirta silicio dioksido mikrodulkių poveikis tokioms cementinio akmens savybėms: tankiui, ultragarso impulso sklaidimo greičiui, stiprumo savybėms, šarminės korozijos atsparumui. Taip pat nustatytas prognozuojamas cementinio akmens atsparumas šalčiui ciklais. Nustatytas silicio dioksido mikrodulkių kiekis, kuriuo bandiniuose pakeitus dalį rišamosios medžiagos CEM I 42,5 R ir CEM II A-V 52,5 N gaunamos geriausios cementinio akmens savybės. Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, metodinė dalis, tyrimų rezultatai ir literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 53 p. teksto be priedų, 34 paveikslai, 8 lentelės, 36 bibliografiniai šaltiniai.			
Prasminiai žodžiai: cementinis akmuo, silicio dioksido mikrodulkės, šarminė korozija, tankis.			

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Civil Engineering Department of Building Materials	ISBN _____ ISSN _____ Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Construction Materials and Products study programme Master Graduation Thesis	
Title The investigation on the properties of hardened cement paste with silica fume Author Kęstutis Barkauskas Academic supervisor Džigita Nagrockienė	
Thesis language: Lithuanian	
Annotation The master thesis analyzes properties of cement stone with silica fume additive. The theoretical part consists of the analysis of the literature, the general knowledge of silica fume, cement stone materials. The master thesis consists of investigation of silica fume cement stone effect on such properties as density, ultrasonic pulse velocity, strength characteristics, resistance to alkali corrosion. Also there was projected cement stone frost resistance cycles. Set silica fume content by replacing a part CEM I 42.5 R and CEM II A-V 52.5 N cement stone capture the best qualities. Structure: introduction, literature review, methodology, investigation results, conclusions and bibliographical entries. Thesis consist of: 53 p. text without appendixes, 34 pictures, 8 tables, 36 bibliographical entries.	
Keywords: cement stone, silica fume, alkali corrosion, density	

TURINYS

Paveikslų ir lentelių sąrašas	9
IVADAS.....	9
1. LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1. Cementinis akmuo.....	13
1.2. Žaliavos ir priedai.....	13
1.3. Silicio dioksido mikrodulkės ir jų panaudojimas	13
2. METODINĖ DALIS	18
2.1. Naudotos medžiagos	18
2.1.1. Rišamoji medžiaga.....	18
2.1.2. Smėlis.....	19
2.1.3. Silicio dioksido mikrodulkės	19
2.1.4. Vanduo	19
2.1.5. Plastifikuojantis priedas	19
2.3. Bandinių gamyba ir sudėtys	20
2.4. Bandinių tyrimų metodikos	21
2.4.1. Sukietėjusio cementinio akmens tankio nustatymas.....	21
2.4.2. Lenkimo ir gniuždymo stiprio nustatymas	21
2.4.3. Ultragarso impulso sklaidimo greičio nustatymas.....	23
2.4.4. Įgėrio nustatymas	23
2.4.5. Įgėrio kinetikos nustatymas	24
2.4.6. Medžiagos kietųjų fazių tūrio nustatymas	24
2.4.7. Medžiagos savitojo tankio nustatymas	25
2.4.8. Medžiagos poringumo nustatymas	25
2.4.9. Prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais	26
2.4.10. Atsparumo šarminei korozijai nustatymas.....	27
3. TYRIMŲ REZULTATAI	29
3.1. Bandinių tankis	29
3.2. Ultragarso impulso sklaidimo greitis	30
3.3. Lenkimo stipris	33
3.4. Gniuždymo stipris.....	36
3.5. Vandens įgėris.....	38
3.6. Vandens įgėrio kinetika	40

3.7. Medžiagos poringumo nustatymas	42
3.8. Prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais	46
3.9. Cementinio akmens šarminės korozijos tyrimo rezultatai	48
IŠVADOS	50
LITERATŪRA	52

Paveikslų ir lentelių sąrašas

PAVEIKSLAI

1.1 pav. SM mikrodulkių gavybos schema.....	13
1.2 pav. SM gamybos schema.....	13
1.3 pav. SM mikrodulkės.....	14
1.4 pav. SM mikrodulkės tarp cemento grūdelių.....	15
2.1 pav. Atsparumo šalčiui priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus.....	25
2.2 pav. Šarminės korozijos tyrimams naudojama įranga: a) nerūdijančio plieno konteineris; b) skaitmeninis indikatorius ir rėmas.....	26
3.1 pav. Tankio ir SM kiekio priklausomybė bandiniuose su CEM I 42,5 R.....	27
3.2 pav. Tankio ir SM kiekio priklausomybė bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N.....	28
3.3 pav. Ultragarso sklaidimo greičio ir SM priedo kiekio cementiniame akmenyje su CEM I 42,5 R priklausomybė po 7 parų kietėjimo.....	29
3.4 pav. Ultragarso sklaidimo greičio ir SM priedo kiekio cementiniame akmenyje su CEM I 42,5 R priklausomybė po 28 parų kietėjimo.....	29
3.5 pav. Ultragarso sklaidimo greičio ir SM priedo kiekio cementiniame akmenyje su CEM II A-V 52,5 N priklausomybė po 7 parų kietėjimo.....	30
3.6 pav. Ultragarso sklaidimo greičio ir SM priedo kiekio cementiniame akmenyje su CEM II A-V 52,5 N priklausomybė po 28 parų kietėjimo.....	31
3.7 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R lenkimo stipris po 7 kietėjimo parų.....	32
3.8 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N lenkimo stipris po 7 kietėjimo parų.....	33
3.9 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R lenkimo stipris po 28 kietėjimo parų.....	34
3.10 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N gniuždymo lenkimo po 28 kietėjimo parų.....	34
3.11 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R gniuždymo stipris po 7 kietėjimo parų.....	35
3.12 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N gniuždymo stipris po 7 kietėjimo parų.....	36
3.13 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R gniuždymo stipris po 28 kietėjimo parų.....	37
3.14 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N gniuždymo stipris po 28 kietėjimo parų.....	37
3.15 pav. Bandinių su CEM I 42,5 N įgėrio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių kiekio.....	38
3.16 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N įgėrio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių kiekio.....	39
3.17 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R įgėrio kinetikos priklausomybė nuo SM	

kiekio.....	40
3.18 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N įgėrio kinetikos priklausomybė nuo SM kiekio.....	41
3.19 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R atviro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio.....	42
3.20 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 R atviro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio.....	42
3.21 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R bendro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio.....	43
3.22 pav. Bandinių su CEM II 42,5 R atviro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio.....	43
3.23 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R uždaro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio.....	44
3.24 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N uždaro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio.....	44
3.25 pav. Prognozuojamo atsparumo šalčiui ciklais priklausomybė nuo SM kiekio su CEM I 42,5 R.....	46
3.26 pav. Prognozuojamo atsparumo šalčiui ciklais priklausomybė nuo SM kiekio su CEM II A-V 52,5 N.....	46
3.27 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R plėtra.....	47
3.28 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N plėtra.....	48

LENTELĖS

1.1 lentelė. SM mikrodulkių rūšys.....	14
1.2 lentelė. Įvairių atmainų SM mikrodulkių aktyvumas bei lyginamasis paviršius.....	16
2.1 lentelė. Cementų charakteristikos.....	17
2.2 lentelė. Smėlio granulimetrinė sudėtis.....	18
2.3 lentelė. Įmaišų charakteristikos.....	19
2.4 lentelė. Cementinio akmens su SM priedu, vieno bandinėlės sudėtis.....	20
3.1 lentelė. Kietųjų fazių tūriai su CEM I 42,5 R.....	45
3.2 lentelė. Kietųjų fazių tūriai su CEM II A-V52,5 N.....	45

IVADAS

Cementinių skiedinių ir betonų gamyboje siekiant pagerinti jų fizikines, mechanines ir eksploatacines savybes, naudojami įvairūs mineraliniai priedai. Norint pagerinti cementinių mišinių ir betonų savybes bei pažaboti šarminę koroziją, dažnai naudojama ferosilicio gamybos atlieka – silicio dioksido mikrodulkės (toliau šiame darbe silicio dioksido mikrodulkių pavadinimas bus trumpinamos į SM).

Šiame magistro darbe nagrinėjamas silicio dioksido mikrodulkių poveikis cementinio akmens savybėms. Galima teigti, jog būtų tikslinga ištirti jų kiekio poveikį cementinio akmens savybėms, pakeičiant jomis dalį cemento. Pakeitus cemento dalį mišinyje galima tikėtis pagerinti cementinio akmens fizikines, mechanines savybes bei apsaugoti jį nuo žalingo šarminės korozijos poveikio. Šiam tikslui pasiekti buvo suformuota dešimt cementinio akmens bandinių partijų su dviem skirtingais cementais ir skirtingu SM kiekiu, pakeičiant jomis cemento dalį. Prizmėms suketėjus buvo ištirtos suketėjusio cementinio akmens fizikinės ir mechaninės savybės. Taip pat išanalizuotos bandinių stiprumo savybės, nustatyti tankiai, vandens įgėrio kinetika, apskaičiuotas prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais ir bandinių deformacijos veikiant šarminei aplinkai.

Baigiamojo darbo metodinėje dalyje parinktos cementinio akmens mišinių sudėtys, nustatytos naudojamų žaliavų savybės ir išnagrinėtos atliktinų bandymų metodikos, kuriomis vadovaujantis buvo atlikti tyrimai ir gauti rezultatai.

Šio darbo tiriamojoje dalyje apžvelgiami gauti atliktų tyrimų rezultatai, kuriais remiantis galima teigti, jog cementinio akmens mišiniuose pakeitus dalį cemento į silicio dioksido mikrodulkes galima tikėtis suketėjusio cementinio akmens mechaninių, fizikinių savybių bei atsparumo šarminei korozijai pagerėjimo. Pakeitus nuo 2,5 % iki 7,5 % cemento masės silicio dioksido mikrodulkėmis buvo gauti geresni fizikinių ir mechaninių (gniuždymo ir lenkimo stiprio padidėjimas, įgėrio sumažėjimas, tankio padidėjimas) savybių rodikliai nei kontrolinių bandinių be šio priedo. Optimalus SM kiekis, kuriuo galima pakeisti cementą, remiantis atliktais tyrimais - nustatytas 7,5 % nuo cemento kiekio.

Darbo tikslas – ištirti silicio dioksido mikrodulkių poveikį cementinio akmens savybėms, panaudojant skirtingus jų kiekius ir jomis pakeičiant atitinkamą cementų dalį.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti šie darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti Lietuvos ir užsienio autorių literatūrą darbo tema.

2. Nustatyti optimalų silicio dioksido mikrodulkių kiekį mišinyje, kuriuo pakeitus dalį cemento, cementinis akmuo pasieks geriausias fizikines, mechanines savybes ir atsparumo šarminei korozijai savybes.
3. Parinkti cementinio akmens sudėtį, reikalingą vienam bandinėliui paruošti.
4. Pagaminti bandinius su skirtingais cementais ir silicio dioksido mikrodulkių kiekiais.
5. Nustatyti suketėjusių cementinio akmens bandinių fizikines-mechanines savybes, apskaičiuoti prognozuojamą atsparumą šalčiui ciklais ir nustatyti atsparumą šarminei korozijai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Cementinis akmuo

(Skripkiūnas 2007) teigia, kad cementinis akmuo yra poringas kūnas, kuriame didžiąją dalį kietosios fazės sudaro koloidinio dispersiškumo mikrokristalai, galintys surišti gana didelį kiekį vandens. Kapiliarinių porų kiekis cementiniame akmenyje priklauso nuo vandens kiekio arba nuo V/C santykio ir hidratacijos laipsnio. Cementiniame akmenyje esančios kapiliarinės poros būna užpildytos vandeniu arba oru, o jų skersmuo siekia nuo 0,1 iki 10 μm . Oro poros dažniausiai būna sferinės formos, o jų skersmuo siekia – nuo 50 iki 100 μm .

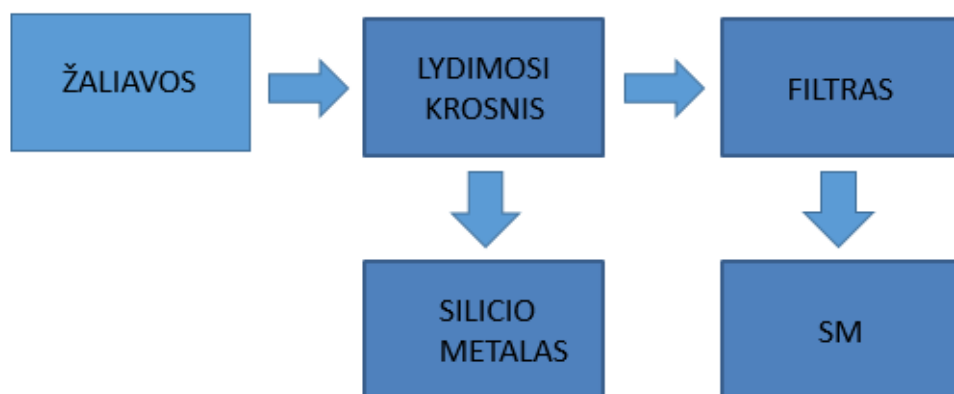
1.2. Žaliavos ir priedai

Pagrindinės cementinį akmenį sudarančios medžiagos yra smėlis, rišiklis – cementas ir specialieji priedai.

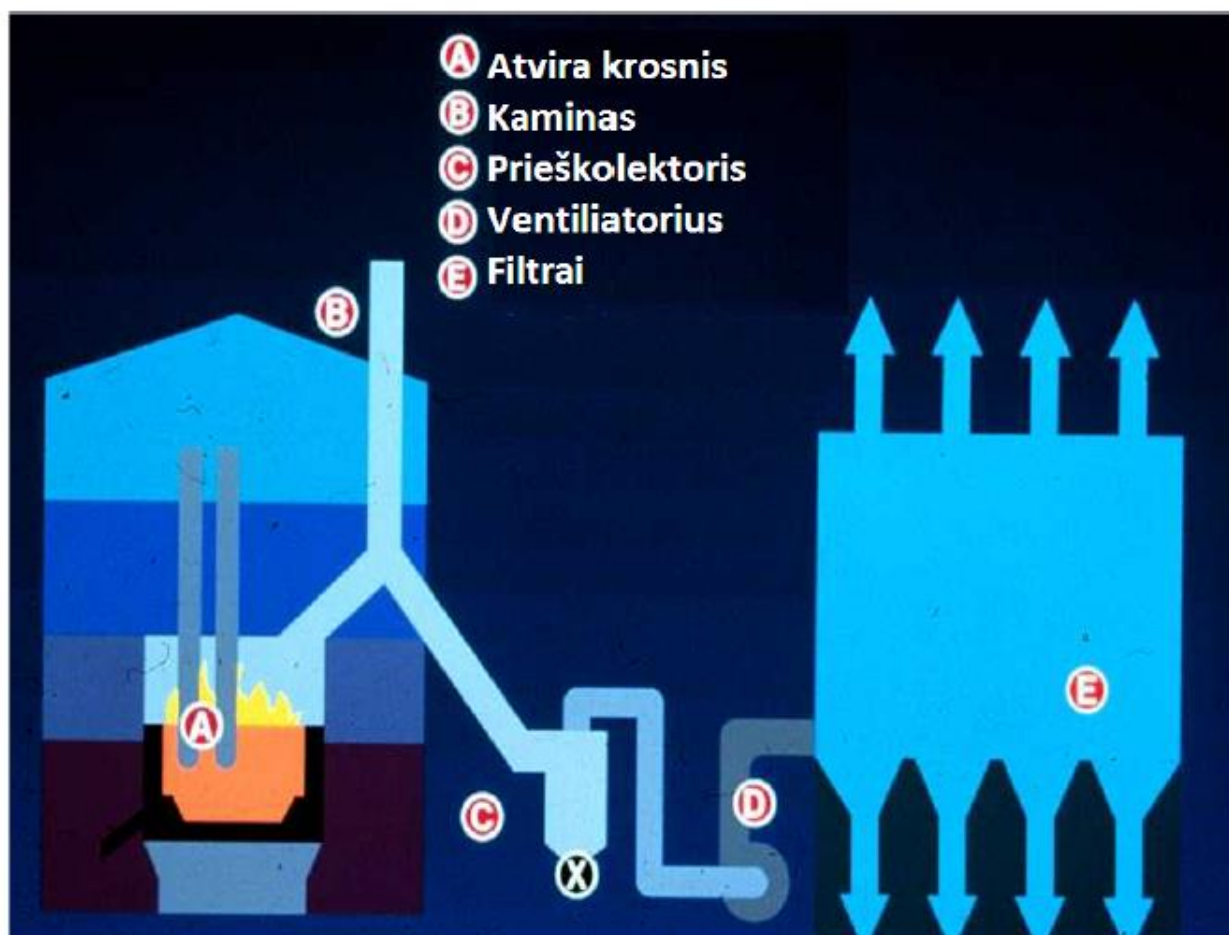
Smėlis - tai nuosėdinė uoliena, susidedanti iš 0,05 – 4 mm skersmens įvairios formos mineralų grūdelių, daugiausia kvarco, lauko špato, žėručio (Žurauskienė *et al.* 2012). Cementinio akmens priedai išskiriami pagal jų daromą poveikį cemento kietėjimui – tai skystikliai, plastikliai, įtraukiantys orą, greitinantys ar lėtinantys rišimąsi arba kietėjimą, mažinantys vandens įgertį, stabdantys išsisluoksniavimą, putinančios ir kt. Visi šie priedai naudojami norint gauti specifinių savybių cementinį akmenį. Taip pat išskiriamas silicinių mikrodulkių naudojimas - tai mineralinės medžiagos, sudarytos iš dalelių, turinčių apytikriai 15 000 cm^2/g savitąjį paviršių ir kurių dydis matuojamas mikronais, pavyzdžiui, silicio dioksido mikrodulkių dalelių dydis remiantis daugelio šalių moksliniais straipsniais yra ultradispersinės sferos vidutinio 0,14 μm dydžio.

1.3 Silicio dioksido mikrodulkės ir jų panaudojimas

SM yra šalutinis silicio arba ferosilicio gamybos produktas. Jų gavyba vyksta redukuojant kvarcinį smėlį arba kvarcitą anglimi lankinėje elektros krosnyje. Proceso temperatūra 2000° C. Reakcijos metu susidaro lakusis SM, kuris krosnies dūmtraukyje kondensuojasi ir oksiduojasi, virsdamas amorfinės struktūros SM mikrodulkėmis (Myhre 2005). Principinė SM gamybos schema pateikta 1.1 paveiksle, o SM gamybos schema pateikta 1.2 paveiksle. Europos šalyse SM, naudojamoms statybinių medžiagų gamyboje, taikomas Europos EN 13263:2005 standartas. Svarbiausia SM mikrodulkes apibūdinantis parametras yra SM kiekis. Standarte nurodoma, kad silicio dioksido kiekis turėtų būti didesnis už 85 %.



1.1 pav. Silicio dioksido mikrodulkių gavybos schema (pagal Silica Fume...2010)



1.2 pav. Silicio dioksido mikrodulkių gamybos schema (Silica Fume...2010)

Gamybos metu lankinės krosnies dūmtraukyje kartu su SM mikrodulkėmis skrieja daug kitų medžiagų garų arba dulkių (oksido šarmų anglies), todėl SiO_2 mikrodulkėse visuomet yra vienokių ar kitokių priemaišų. Nemažą priemaišų dalį (iki 3 %) sudaro anglis, kuri gali būti

įvairaus pavidalo: kokso liekana, silicio karbonatas, dervos likučiai. Anglies priemaišos nulemia SM dulkių spalvą, kuri būna nuo beveik juodos iki baltos (1.3 pav.).



1.3 pav. Silicio dioksido mikrodulkės (Silica Fume...2010)

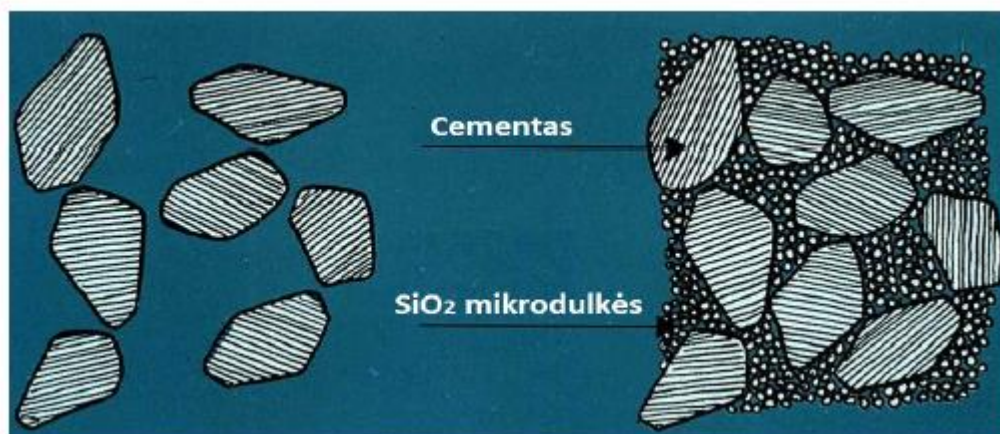
Skiediniams gaminti naudojamos įvairių markių skirtingų gamintojų SM, kurių cheminė sudėtis dėl esamų jose priemaišų gali labai skirtis (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Silicio dioksido mikrodulkių rūšys

Markė, šalis	Cheminė sudėtis, %									
	SiO ₂	C	H ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Kiti
Elkem-983, Norvegija	98	0,23	0,6	0,02	0,09	0,08	0,2	0,06	0,17	0,55
Elkem-971, Norvegija	97,6	0,27	0,8	0,07	0,22	0,08	0,28	0,09	0	0,59
RW-Q1, Vokietija	97	0,4	0,4	0,03	0,3	0	0,8	0,05	0,2	0,82
FS 94, Vokietija	96,9	0	0	0,56	0,42	0,11	0,16	0,02	0,21	1,62
RW Fuller, Vokietija	98	0,6	0,3	0,05	0,1	0,35	0,2	0,1	0,25	0,05
FS-92, Vokietija	91	0	0	1,26	0,92	0,23	1,09	0,08	0,64	4,78
Silimic, Lenkija	88	1,5	1,3	1,5	1,5	0	2	0,6	1	2,6

Rentgenogramų analizė rodo, kad nedegtos SM yra amorfinė medžiaga, kurioje pastebima žematemperatūrinė kristobalito struktūra. SM mikrodulkių dalelės yra apie 100 kartų smulkesnės už cemento daleles, todėl lengvai patenka į tarpus tarp cemento dalelių, taip jos

pagerina betono mišinio granuliometriją (Skripkiūnas *et al.* 2000). Pasiskirstymo vaizdas pateiktas (1.4 pav.)



1.4 pav. Silicio dioksido mikrodulkės tarp cemento grūdelių (pagal Silica Fume...2010)

SM dėl didelio savitojo paviršiaus padidina vandens poreikį tai pačiai betono mišinio konsistencijai gauti, tačiau naudojant superplastiklius šis neigiamas reiškinys yra panaikinamas ir tokiu atveju galima gauti didesnį cementinio akmens, skiedinio ir betono tankį bei stiprį. Kadangi SM telpa tarp cemento dalelių, jos pagerina cemento granuliometrinę sudėtį, padidina cementinio akmens tankį, santykinai sumažina vandens poreikį, skaičiuojant pagal dispersinės fazės kiekį (Bache 1981). SM mikrodulkių kiekis turi būti toks, kad užtikrintų optimalų cementinio akmens tankį. Per didelis SM mikrodulkių kiekis tik padidina tarpus tarp cemento dalelių ir pablogina cementinio akmens savybes.

SM dėl didelio hidraulinio aktyvumo intensyviai reaguoja su cemento hidratacijos produktais, sudarydamos papildomą naujadarų, užpildančių cementinio akmens poras, kiekį. Dėl to padidėja cementinio akmens stipris ir sumažėja laidumas (Skripkiūnas 1998). Lietuvos mokslininkai ištyrė kelis SM įmaišymo būdus: permalant cementą su SM rutuliniame malūne, įmaišant sausas mikrodulkes į cementą, ruošiant SM suspensiją vandenyje, o po to malant ją su cementu ir ruošiant SM mikrodulkių suspensiją plastiklio tirpale ir vėliau maišant ją su cementu. Išsiaiškinta, kad efektyviausias SM įmaišymo būdas yra ruošiant jų suspensiją plastiklio tirpale.

Gautos išvados:

1. SM turi didelę įtaką cementinio akmens ir užpildų kontaktinės zonos struktūrai ir savybėms.
2. SM efektyviau veikia su didesniu V/C santykiu (Skripkiūnas *et al.* 2000).

Lietuvos mokslininkai ištyrė įvairių atmainų SM aktyvumą, kuris vėliau buvo lyginamas su Stonišio vietovės malta karbonatine opoka. Rezultatai pateikti (1.2 lentelė).

1.2 lentelė. Įvairių atmainų silicio dioksido mikrodulkių aktyvumas bei lyginamasis paviršius.

SM atmaina	SM paruošimas	Aktyvumas, mgCaO/g	Savitasis paviršius, m²/kg
Holla mikrosilika	Be paruošimo	177	360
	Smulkinant 1 min.	309	810
Fesil mikrosilika	Be paruošimo	190	440
	Smulkinant 1 min.	320	-
Šveicariškoji mikrosilika HR	Be paruošimo	227	300
	Smulkinant 1 min.		720
Ukrainietiškos SiO ₂ mikrodulkės	Be paruošimo	273	2200
	Smulkinant 1 min.	315	760
Opokos milteliai	Sijota per 0,14 sietą	165	920
	Sijota per 0,063 sietą	226	1590

Pagal 1.2 lentelės duomenis galima teigti, kad įvairių SM aktyvumas priklauso nuo jų savitojo paviršiaus (Vekteris *et al.* 2006).

2. METODINĖ DALIS

2.1. Naudotos medžiagos

Didžiausią tirtą cementinio akmens dalį sudaro smulkusis užpildas - smėlis, užimantis apie 70 % cementinio akmens masės. Smėlis yra plačiai paplitęs visoje Lietuvos teritorijoje, tik ne visur vienodai lengvai pasiekiami dėl gamtinių sąlygų. Cementas, gaminamas iš kalkakmenio, kurio cheminė sudėtis, tinkama cemento gamybai, yra ribota.

2.1.1. Rišamoji medžiaga

Cementinių skiedinių rišamoji medžiaga yra cementas. Tai hidraulinė rišamoji medžiaga, kuri, kontaktuodama su vandeniu rišasi ir kietėja, o sukietėjusi nepraranda savo stiprumo savybių. Kaip teigia Žurauskienė ir kt. (Žurauskienė *et al.* 2012), cemento kokybė privalo būti užtikrinta nuo gamybos iki suvartojimo. Šiam tikslui Lietuvoje galioja pagrindiniai standartai, reglamentuojantys įprastinių cementų bei jų komponentų reikalavimus - LST EN 196 ir LST EN 197 grupės standartai.

Bandiniams formuoti buvo pasirinkti du skirtingi portlandcementai. Portlandcementis CEM I 42,5 R ir portlandcementis CEM II A-V 52,5 N, kurių charakteristikos pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Cementų charakteristikos

Cemento savybės	CEM I 42,5 R	CEM II A-V 52,5 N
Mechaninės ir fizikinės		
Stipris gniuždant, MPa		
po 1 paros	-	21
po 2 parų	28 ± 2	31
po 28 parų	54 ± 3	58
Rišimosi pradžia, min	160	150
Rišimosi pabaiga, min	-	-
Tūrio pastovumas, mm	1,0	-
Vandens sąnaudos, %	25,1	-
Liekana ant st. 90 µm sieto, %	1,5	-
Savitasis paviršius, (cm ² /g)	3700	3000
Cheminės		
Skaitmenys, %	1,4	1,1
Netirpmenys, %	0,4	-
Sulfatų (SO ₃) kiekis, %	2,8	3,5
Chloridai (Cl ⁻), %	0,003	0,08
Šarmų kiekis, sk. Na ₂ O ekv, %	< 0,8	-
Hidratacijos šiluma, J/g	373	-

2.1.2. Smėlis

Atliekant tyrimus buvo naudojamas 0/4 frakcijos smėlis, kurio granulimetrinė sudėtis pateikta 2.2 lentelėje.

2.2. lentelė. Smėlio granulimetrinė sudėtis

Sieto numeris,mm	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8
Išbyra	0	1,5	3	12,2	23	51	74	94,9	100	100
Minimalus	0	0	1	10	15	35	60	90	98	100
Maksimalus	0	3	5	18	30	55	80	99	100	100

2.1.3. Silicio dioksido mikrodulkės

Tiriamajam darbui atlikti naudotos silicio dioksido mikrodulkės. Tai buvo tiriamoji medžiaga, kurios daromą poveikį cementiniam akmeniui buvo norima iširti. Silicio dioksido mikrodulkėmis keičiamos rišamosios medžiagos – cemento kiekis cementiniame akmenyje.

2.1.4. Vanduo

Vanduo cementinio akmens mišinyje yra jungiamoji skystoji fazė, kuri, reaguodama su cimente esančiomis rišamosiomis medžiagomis, sudaro pakankamo stiprumo ir tinkamų savybių cementinį akmenį (Žurauskienė *et al.* 2012). Taip pat vanduo, naudojamas cementiniam akmeniui gaminti, privalo atitikti techninius reikalavimus, kuriuos apibrėžia LST EN 1008:2003 standartas. Pavyzdžiui, vandenyje neturi būti dažančių medžiagų, naftos atliekų, turi būti atitinkamas chloridų bei kitų žalingų įmaišų kiekis, vandens pH neturi būti mažesnis nei 4 ir nedidesnis kaip 12,5.

2.1.5. Plastifikuojantis priedas

Superplastiklis – tai priedas, kurio įdėjus į cementinio akmens mišinį ir nekeičiant vandens kiekio galima padidinti mišinio slankumą arba, mažinant vandens kiekį (apie 12 %), jį išlaikyti.

Lentelėje 2.3 pateikti naudoto superplastiklio duomenys, kurie yra deklaruojami gamintojo. Šis superplastiklis yra pagamintas polikarboksilato pagrindu, jo tankis yra $1,07 \text{ g/cm}^3$ ir rekomenduojamas dozavimas yra 2-50 gramų medžiagos į 1 kilogramą cemento mišinyje.

2.3 lentelė. Įmaišų charakteristikos

Įmaiša	Plastifikuojantis priedas
Įmaišos tipas	Superplastiklis, polikarboksilato pagrindu
Įmaišos forma	Skystas
Spalva	Ruda
Tankis kg/dm^3	1,07
Dozavimas, g (1kg cemento)	2-50
Maksimalus chloridų kiekis, %	< 0,1
Maksimalus šarmų kiekis, %	< 1,0

2.3. Bandinių gamyba ir sudėtys

Remiantis RILEM rekomenduojamu bandymo metodu: AAR-2 (ypač greitas skiedinio metodas) buvo pasirinktos cementinio akmens bandinių sudėtys. Tiriamųjų bandinių sudėtys yra pateiktos 2.4 lentelėje. Kaip matyti iš pateiktų duomenų, laboratorijoje buvo suformuotos penkios bandinių partijos su kiekvienu cementu: viena, kontrolinių bandinių be SM priedo ir keturios su SM priedu. SM priedo kiekis buvo didinamas 2,5 % intervalais nuo kontrolinių bandinių projektinės cemento masės, atitinkamai mažinant cemento kiekį mišinyje. Smėlio kiekis mišiniuose nebuvo keičiamas. Norint išlaikyti nekintamą V/C santykį, į mišinį buvo dedamas superplastiklis.

Pagal RILEM rekomenduojamą bandymų metodiką buvo parinktas reikalingas medžiagų kiekis bandiniams pagaminti. Laboratorijoje mechaniniu būdu buvo pagamintos 5 cementinio akmens bandinių partijos su kiekvienu cementu. Jos skyrėsi SM kiekiu 0 – 10 % nuo cemento masės. Cementinio akmens mišinio masei po sumaišymo su priverstinio maišymo maišykle buvo nustatomas pasklidumas ir ji dedama į prieš tai paruoštas ir išteptas alyva formas, kurių

matmenys - 40 mm/ 40mm/ 160mm. Formos su mišiniu buvo sutankintos ant vibravimo stalelio ir kietėjo 24 valandas. Po paros kietėjimo ore bandiniai buvo išimti iš formų ir panardinti į 20 °C vandenį tolesniam kietėjimui.

2.4 lentelė. Cementinio akmens su SM priedu sudėtys vienam bandiniui

SM, %	Cementas, g	Užpildas, g	Vanduo, ml	Plastiklis, g	SM, %	V/C	Pasklidimas, mm	
							CEM I	CEM II
0	200	450	94	-	-	0,47	205	203
2,5	195	450	94	-	2,5	0,47	206	205
5	190	450	94	2,8	5	0,47	210	206
7,5	185	450	94	5,6	7,5	0,47	219	208
10	180	450	94	11,2	10	0,54	215	210

2.4. Bandinių tyrimų metodikos

2.4.1. Sukietėjusio cementinio akmens tankio nustatymas

Tiriamųjų bandinių tankis buvo nustatytas remiantis LST EN 12390-7:2009. Bandinių tankis apskaičiuotas pagal formulę:

$$\rho = \frac{m_0}{V},$$

čia

m_0 – pastovios masės bandinio masė, kg;

V – įsotinto vandens bandinio tūris, m^3 ;

ρ – tankis, kg/m^3 .

2.4.2. Lenkimo ir gniuždymo stiprio nustatymas

Pagal LST EN 1015-11:2002 (Mūro skiedinio bandymo metodai. 11 dalis. Sukietėjusio skiedinio stiprio lenkiant ir gniuždant nustatymas) nustatomas sukietėjusio skiedinio lenkimo stipris.

Naudojama įranga:

- Bandymo mašina;

- Slankmatis.

Bandymo eiga:

Skiedinio lenkimo stipris nustatomas suformuotą suketėjusio skiedinio prizmę apkraunant trijuose taškuose iki lūžimo. Švariai nuvalomi visi bandymo mašinos atraminiai paviršiai, o nuo bandinių paviršiaus, susiliečiančio su ritiniais, pašalinami bet kokios išsikišusios medžiagos. Bandinys padedamas ant atraminių ritinių. Apkrova pridedama tolygiai be smūgių, pastoviu nuo 0,01 MPa/s iki 0,05 MPa/s greičiu taip, kad bandinys sulūžtų. Užrašoma didžiausia ardančioji jėga. Lenkimo stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_{ct} = \frac{F}{A}, MPa$$

Čia:

f_c – lenkimo stipris, Mpa;

F – ardančioji apkrova, N;

A – bandinio skerpjūvio plotas, kurį veikia lenkimo jėga, mm².

Stipris gniuždant nustatomas naudojant 40 x 40 x 160 mm prizmes, kurios gaminamos ir laikomos 28 paras pagal LST EN 1015-11:2002 (Mūro skiedinio bandymo metodai. 11 dalis. Sukietėjusio skiedinio stiprio lenkiant ir gniuždant nustatymas).

Naudojama įranga:

- Bandymo mašina;
- Slankmatis.

Bandymo eiga:

Skiedinio gniuždymo stipris nustatomas bandant dvi prizmės dalis, gautas bandant lenkimo stiprį. Nuo bandinio šonų pašalinamos visos atskilusios birios arba kitokios dalelės, jas nutrinant. Bandinys kruopščiai padedamas į bandymo mašiną taip, kad apkrova būtų perduodama visam bandinio paviršiaus plotui. Apkrova pridedama be smūgio ir didinama pastoviu 0,05 MPa/s greičiu. Užrašoma didžiausia ardančioji jėga. Gniuždymo stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_c = \frac{F}{A}, MPa$$

Čia:

f_c – gniuždymo stipris, MPa;

F – ardančioji apkrova, N;

A – bandinio skerpjūvio plotas, kurį veikia gniuždymo jėga, mm².

2.4.3. Ultragarso impulso sklidimo greičio nustatymas

Ultragarso impulso sklidimo greičio nustatymas yra neardomasis cementinio akmens savybių tyrimo metodas. Atliekant šį tyrimą galima nustatyti vidinių pažeidimų, tokių kaip, atsisluoksniavimas, vidiniai struktūros pakitimai, sutankėjimai ar išretėjimai, įtrūkimai, netolygus medžiagų pasiskirstymas ir kitus defektus. Kaip teigia L. Mažeika (Mažeika 2007), matavimai atliekami aukšto dažnio garso bangoms sklindant medžiagoje iš siūstuvo į imtuvą. Garso bangos savo kelyje sutinka kliūtis, sutankėjimus ar kitus defektus, todėl keičiasi bangos greitis ir dalis energijos nuo kliūties yra atspindima. Kuo didesnis skaičius mikro įtrūkimų cementiniame akmenyje, tuo ilgiau ultrgarsui užtrunka pereiti nuo siūstuvo iki imtuvo - dėl šios priežasties mažėja ultragarso impulso sklidimo greitis. Šis tyrimo metodas reikalingas nustatant visuminį medžiagos kokybės lygį. Jis nustatomas tik išdžiovintiems ir ataušintiems iki aplinkos temperatūros bandiniams.

Darbai atlikti bandiniai buvo išdžiovinti ir išmatuotas prizmių ilgis, mm. Ultragarso matavimo įranga buvo sukalibruota naudojantis etalonu, imtuvo ir siūstuvo kontaktų vietos suteptos specialiu tepalu. Išmatuotos ultragarso sklidimo greičio vertės μ s buvo užfiksuotos ir naudojantis pateikta formule buvo apskaičiuotas ultragarso sklidimo greitis bandiniuose m/s.

$$V = \frac{l}{\tau \cdot 10^{-6}}, m/s$$

Čia:

V – ultragarso impulso sklidimo greitis, m/s;

l – impulso sklidimo kelias, m;

τ - impulso sklidimo laikas, μ s.

2.4.4. Įgėrio nustatymas

Kiekvienas bandinys buvo dedamas į džiovinimo kamerą taip, kad atstumas tarp bandinių būtų mažiausiai 15 mm. Bandinys džiovinamas (105 ± 5) °C temperatūros džiovyklėje, kol pasiekama pastovi masė m_2 . Po džiovinimo kameroje bandiniai buvo panardinti į vonelę pripildytą švariu geriamuoju vandentiekio vandeniu, vandens lygis buvo sureguliuotas taip, kad bandiniai pastoviai būtų apsemti 2-3 cm. Cementinio akmens bandinių vandens įgėris buvo nustatytas bandinių, kurie mirko 4 paras (20 ± 5) °C ir pasiekė pastovią masę m_1 . Pastovi masė būna pasiekta, kai dviejų svėrimų kas 24 h rezultatai skyrėsi mažiau nei 0,1 %. Sukietėjusio cementinio akmens bandinių įgėris buvo nustatytas pagal formulę:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 ,$$

čia

W – vandens įgėris, %;

m_0 - visiškai sauso bandinio masė, g;

m_1 - normaliosiomis sąlygomis įmirkusio bandinio masė, g;

2.4.5. Įgėrio kinetikos nustatymas

Kiekvienas bandinys dedamas į džiovinimo kamerą taip, kad atstumas tarp bandinių būtų mažiausiai 15 mm. Bandinys džiovinamas (105 ± 5) °C temperatūros džiovinimo kameroje, kol pasiekiami pastovi masė m_0 . Buvo nustatomas vandens įgėris po 15 min., 30 min., 45 min., 1 val., 2 val., 3 val., 4 val., 5 val., 6 val., 7 val., 8 val., 24 val., 48 val., 72 val., 96 val., kad galima būtų nustatyti įgėrio kinetiką. Nuo bandinių prieš svėrimą buvo nuvalomas vandens perteklius su sudrėkintu ir išgręžtu skudurėliu, dedama ant laboratorinių svarstyklių ir fiksuojama bandinio masė m_1 . Sukietėjusio cementinio akmens bandinių įgėrio kinetika procentais buvo nustatoma pagal formulę:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 ,$$

čia

W – vandens įgėris, %;

m_0 - visiškai sauso bandinio masė, g;

m_1 - normaliosiomis sąlygomis įmirkusio bandinio masė, g;

2.4.6. Medžiagos kietųjų fazių tūrio nustatymas

Kad būtų galima rasti medžiagos kietųjų fazių (be porų) tūrį, bandinys sutrinamas iki miltelių smulkumo. Dalelių tūris nustatomas piknometriniu metodu: atsveriamas 15 g sausų medžiagos miltelių (m), supilama į piknometrą ir užpilama žibalu (ne daugiau kaip pusė piknometro tūrio). Piknometras pavartomas, kad pasišalintų oras, ir 10 min. leidžiama mišiniui nusistovėti. Į piknometrą iki brūkšnio pripilama žibalo (susiformavęs žibalo apatinis meniskas turi siekti brūkšnį), piknometras pasveriamas (m_2), tada išplaunamas, vėl pripildomas žibalo iki brūkšnio ir pasveriamas (m_1).

$$V_a = \frac{m + m_1 - m_2}{\rho_z},$$

čia

V_a – medžiagos kietųjų fazių tūris, g/cm^3 ;

m – bandinio masė, g;

m_1 – piknometro su žibalu masė, g;

m_2 – piknometro su žibalu ir milteliais masė;

ρ_z – 0,8 g/cm^3 žibalo tankis.

2.4.7. Medžiagos savitojo tankio nustatymas

Savitasis medžiagos tankis – ρ , tai absoliučiai tankios medžiagos tankis be porų ir tuštumų tūrio vieneto masė. Savitasis tankis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho = \frac{m}{V_a},$$

čia

ρ – medžiagos savitasis tankis, g/cm^3 ;

m – bandinio masė, g;

V_a – medžiagos kietųjų fazių tūris, g/cm^3 ;

Medžiagos savitasis tankis perskaičiuojamas, kg/m^3 .

2.4.8. Medžiagos poringumo nustatymas

Poringumas yra pagrindinė medžiagos struktūros charakteristika, nulemianti medžiagos tankį, laidumą šilumai ir orui, atsparumą šalčiui, įgėrį, stiprį, akustines ir kitas savybes. Cementinio akmens poringumas apskaičiuojamas turint cementinio akmens tankio, savitojo tankio ir vandens įgėrio vertes. Bendras cementinio akmens poringumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$P_b = \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_s}\right),$$

čia

P_b – bendrasis cementinio akmens poringumas, %;

ρ_c – cementinio akmens tankis, kg/m^3 ;

ρ_s – cementinio akmens savitasis tankis, kg/m^3 .

Cementinio akmens atvirasis (kapiliarinis) poringumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$P_a = W_p \cdot \frac{\rho_c}{1000},$$

čia

P_a – atvirasis cementinio akmens poringumas, %;

W_p – pilnasis cementinio akmens bandinių vandens įgėris, %;

ρ_c – cementinio akmens tankis, kg/m^3 .

Cementinio akmens uždarasis poringumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$P_u = P_b - P_a,$$

čia

P_u – uždarasis cementinio akmens poringumas, %;

P_a – atvirasis cementinio akmens poringumas, %;

P_b – bendrasis cementinio akmens poringumas, %.

2.4.9. Prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais

Žinant cementinio akmens poringumo parametrus galima prognozuoti cementinio akmens atsparumą šalčiui ciklais pagal atsparumo šalčiui kriterijų K_f , tačiau tam reikia žinoti atvirą ir uždarą cementinio akmens poringumą, vandens įgėrį bei tankį. Atsparumo šalčiui kriterijus apskaičiuojamas pagal formulę:

$$K_f = \frac{P_u}{0,09P_a},$$

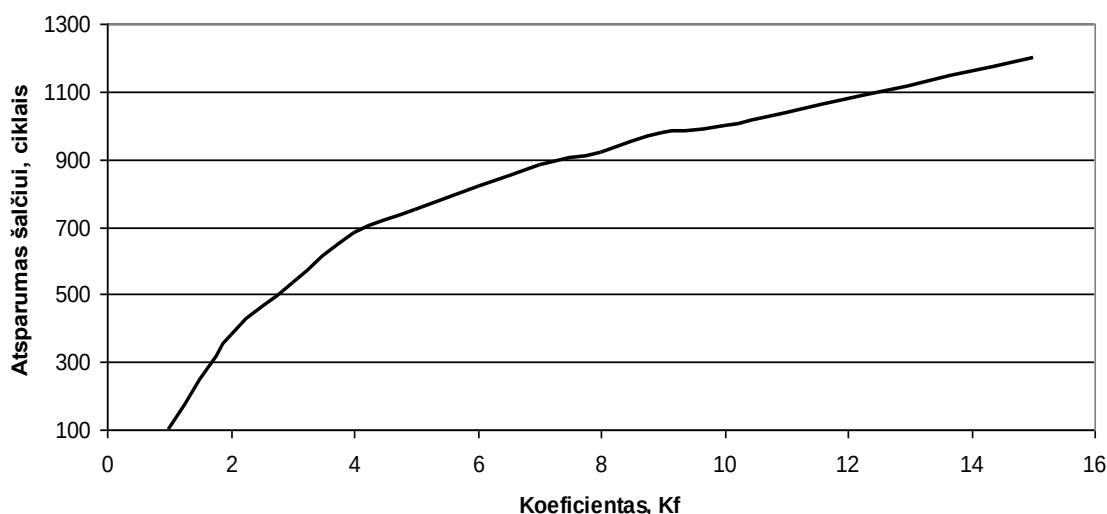
čia

P_u – uždaras poringumas;

P_a – atviras poringumas;

K_f – atsparumo šalčiui kriterijaus reikšmė;

Apskaičiavus cementinio akmens atsparumo šalčiui kriterijų K_f , pagal pateiktą 2.1 paveikslą nustatomas prognozuojamas užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičius, kurį turėtų atlaikyti cementinis akmuo.



2.1 pav. Atsparumo šalčiui priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus

2.4.10. Atsparumo šarminei korozijai nustatymas

Tyrimai buvo atliekami pagal RILEM rekomenduojamą bandymų metodą: AAR-2 (ypač greitas skiedinio metodas). Tai metodas, įvertinantis užpildų reaktyvumo lygį. AAR-2 metodo esmė – sukietinti 80 °C vandenyje skiedinio bandiniai (40x40x160 mm) 14 parų laikomi 1M NaOH tirpale, esant 80 °C, ir matuojama jų plėtra.

Smėlis džiovinamas 16 val. 100–110° C temperatūroje. Gaminant skiedinį buvo imama 1 dalis cemento su 2,25 dalimis užpildo. Tokio bandinio prizmei (40 mm × 40 mm × 160 mm) reikia naudoti 200 g cemento ir 450 g užpildo. Buvo gaminamos 5 prizmės su skirtingu SM mikrodulkių kiekiu: 0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 %, 10 %, keičiant cementą. Vandens cemento santykis imamas 0,47. Skiedinio pasklidimo skersmuo turi būti nuo 205 iki 220 mm. Bandinių pailgėjimai matuojami skaitmeniniu indikatoriumi, kurio padalos vertė 0,001 mm. Jis standžiai įtvirtinamas rėme (2.2 b pav.), į kurį įstatomos prizmelės. Bandinio galuose yra įlietos įdėtinės detalės, į kurias įstatomos rėmo ir indikatoriaus ašelės. Suformuotų prizmelių ilgis (l) yra išmatuojamas ir prizmelės dedamos į 80° C vandenį. Po 24 valandų vėl yra išmatuojamas prizmių ilgis (nulinis rodmuo L_0). Vėliau bandiniai sudedami į nerūdijančio plieno konteinerius (2.2 a pav.), kuriuose yra 80°C 1 M NaOH šarmo tirpalas. Konteineriai su bandiniais įdedami į

klimate kamerą, kurioje palaikoma 80 ° C temperatūra. Bandinių ilgis yra matuojamas periodiškai tuo pačiu paros metu. Kai bandiniai išimami po 24 ± 2 valandų išlaikymo vandenyje 80°C temperatūroje, yra fiksuojamas ilgis, t.y. nulinis matmuo (L_0), kuris naudojamas kaip atskaitos taškas bandinių plėtrai matuoti. Bandinius įdėjus 80°C 1 M NaOH šarmo tirpale bandinių matmenys (L_n) fiksuojami po 1, 3, 6, 9, 14, 28, 56 parų ± 2 valandos. Plėtra apskaičiuojama pagal formulę:

$$\text{Plėtra, \%} = \left(\frac{L_n - L_0}{L_0} \right) \times 100 \, \%.$$



2.2 pav. Šarminės korozijos tyrimams naudojama įranga: a) nerūdijančio plieno konteineris; b) skaitmeninis indikatorius ir rėmas

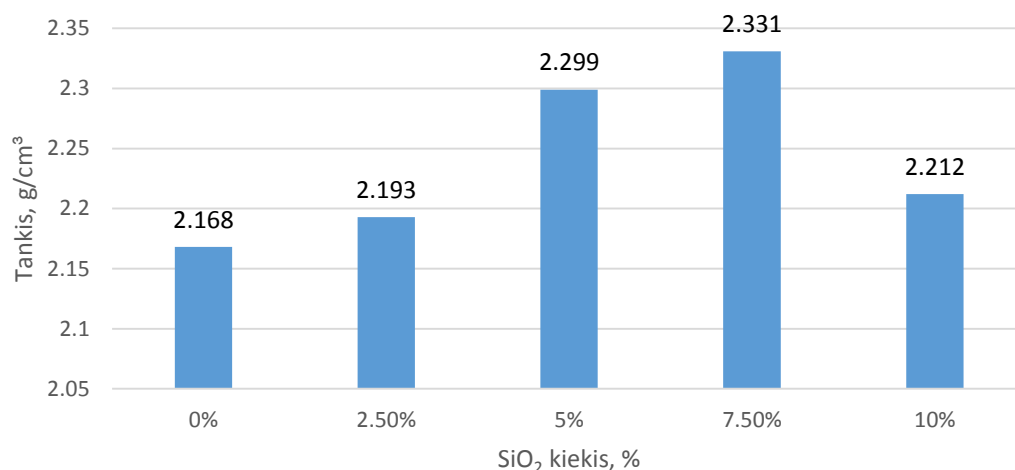
3. TYRIMŲ REZULTATAI

3.1. Bandinių tankis

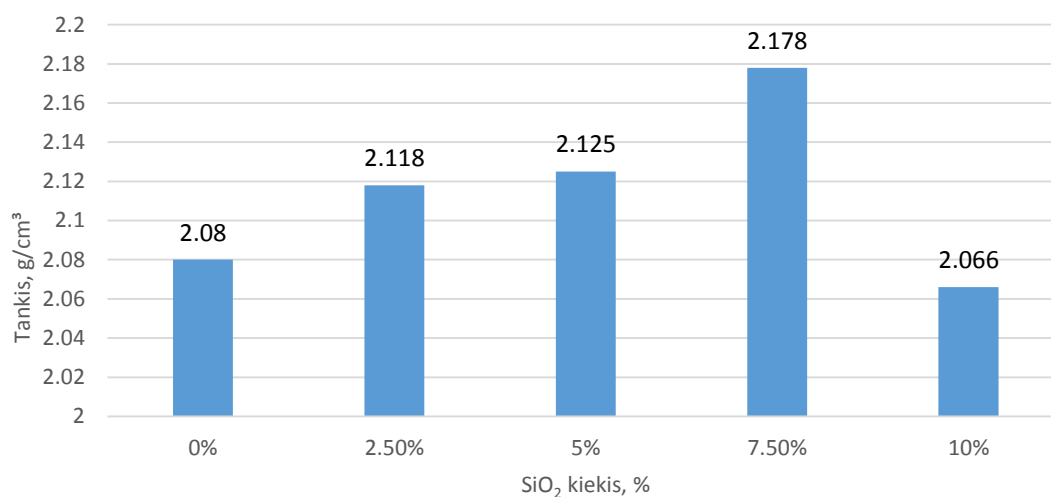
Sukietėjusio cementinio akmens bandinių tankis buvo nustatytas remiantis LST EN 1015-10:2002 (Mūro skiedinio bandymo metodai. 10 dalis. Sukietėjusio sauso skiedinio tūrinio tankio nustatymas) standartu. Atlikus tankio nustatymo tyrimus gauti rezultatai, kurie pateikiami 3.1 ir 3.2 paveiksluose. Iš gautų tyrimų rezultatų galima nustatyti, kad naudojant SM cementiniame akmenyje, juo keičiant cemento dalį, kinta jų tankis priklausomai nuo naudojamų silicio dioksido mikrodulkių kiekio. Didžiausias tankis bandinių su CEM I 42,5 buvo pasiektas bandinių su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė $2,331 \text{ g/cm}^3$, o mažiausias tankis $2,168 \text{ g/cm}^3$, buvo kontrolinių bandinių su 0 % SM priedo. Bandinių su 7,5 % SM priedu tankis buvo 7 % didesnis už kontrolinių bandinių ir tai sudaro 163 g/cm^3 skirtumą. Bandinių tankis tendencingai didėjo nuo $2,168 \text{ g/cm}^3$ iki $2,331 \text{ g/cm}^3$ didinant SM kiekį nuo 0 % iki 7,5 %, tačiau toliau didinant tiriamojo priedo kiekį bandiniuose buvo pastebėta, jog tankis pradeda mažėti. Į mišinį pridėjus 10 % silicio dioksido mikrodulkių tankis sumažėjo iki $2,212 \text{ g/cm}^3$.

Atitinkamai didžiausias tankis bandinių su CEM II A-V 52,5 N buvo pasiektas bandinių su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė $2,178 \text{ g/cm}^3$, o mažiausias tankis $2,080 \text{ g/cm}^3$, buvo kontrolinių bandinių su 0 % SM priedo. Bandinių su 7,5 % SM priedu tankis buvo 4,5 % didesnis už kontrolinių bandinių ir tai sudaro 98 g/cm^3 skirtumą. Bandinių tankis tendencingai didėjo nuo $2,080 \text{ g/cm}^3$ iki $2,178 \text{ g/cm}^3$ didinant SM kiekį nuo 0 % iki 7,5 %, tačiau toliau didinant tiriamojo priedo kiekį bandiniuose buvo pastebėta, jog tankis pradeda mažėti. Į mišinį pridėjus 10 % silicio dioksido mikrodulkių tankis sumažėjo iki $2,066 \text{ g/cm}^3$.

Didinant SM kiekį cementinio akmens mišinyje iki 10 % nuo cemento masės, bandinių tankiai buvo mažesni nei bandinių su 7,5 % šio priedo, nes esant pertekliniam SM kiekiui liko nesureagavusio priedo, ko pasekoje sumažėjo bandinių tankis.



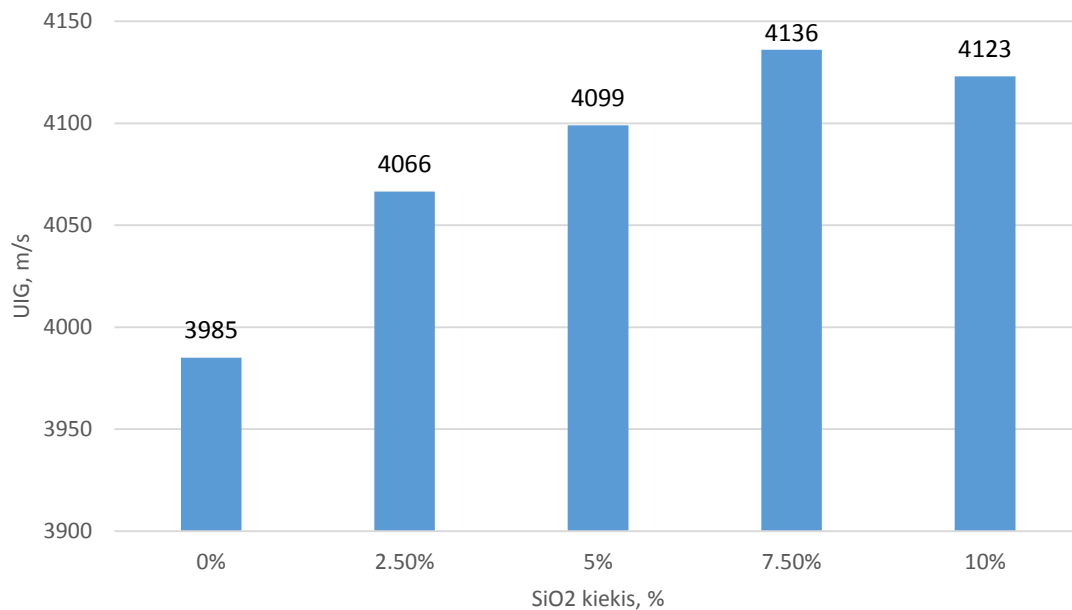
3.1 pav. Tankio ir SM kiekio priklausomybė bandiniuose su CEM I 42,5 R



3.2 pav. Tankio ir SM kiekio priklausomybė bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N

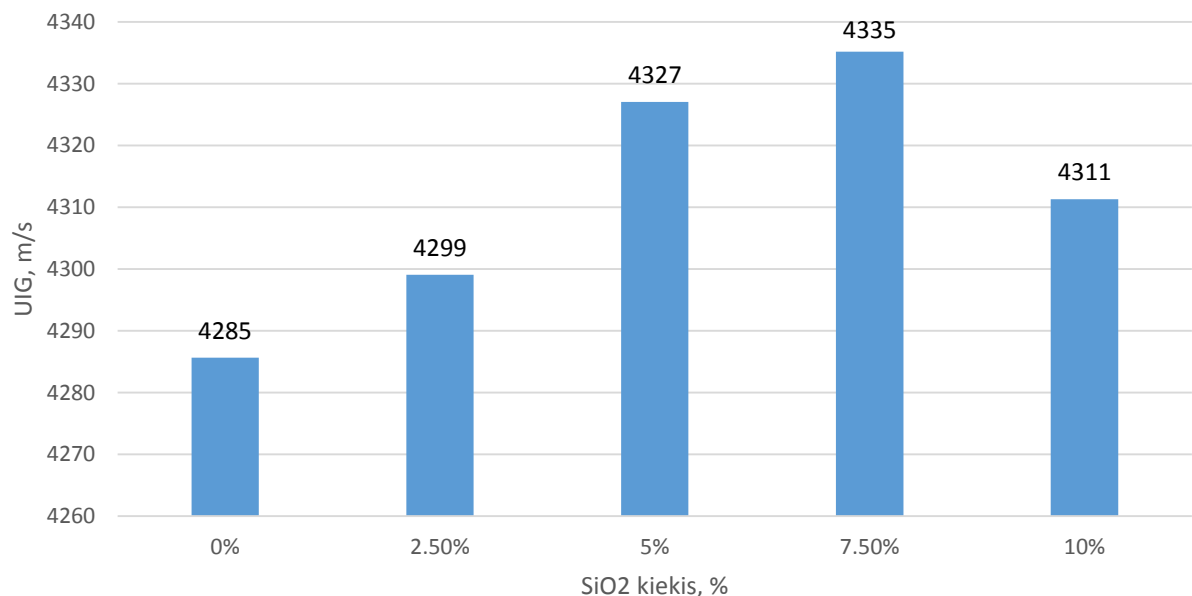
3.2. Ultragarso impulso sklaidimo greitis

Ultragarso impulso sklaidimo greitis buvo nustatytas cementinio akmens bandiniams po 7 ir 28 kietėjimo parų, vadovaujantis metodinėje dalyje pateikta metodika. Bandymo tyrimų rezultatai pateikti 3.3, 3.4, 3.5 ir 3.6 paveiksluose. Iš pateiktų tyrimų rezultatų (3.3, 3.4, 3.5 ir 3.6 pav.), nustatyta, kad ultragarso impulso sklaidimo greitis priklauso nuo silicio dioksido mikrodulkių kiekio esančio bandiniuose. Atlikus tyrimus nustatyta, kad didinant SM kiekį cementinio akmens bandiniuose, ultragarso impulso sklaidimo greitis didėjo. Bandiniams su CEM I 42,5 R kietėjusiems 7 paras, ultragarso impulso sklaidimo greitis (toliau – UIG) didėjo, SM priedo kiekį didinant iki 7,5 % ir siekė 4136 m/s, o kontrolinių bandinių 3985 m/s. SM kiekį didinant daugiau nei 7,5 % UIG sumažėjo iki 4123 m/s (3.3 pav.).



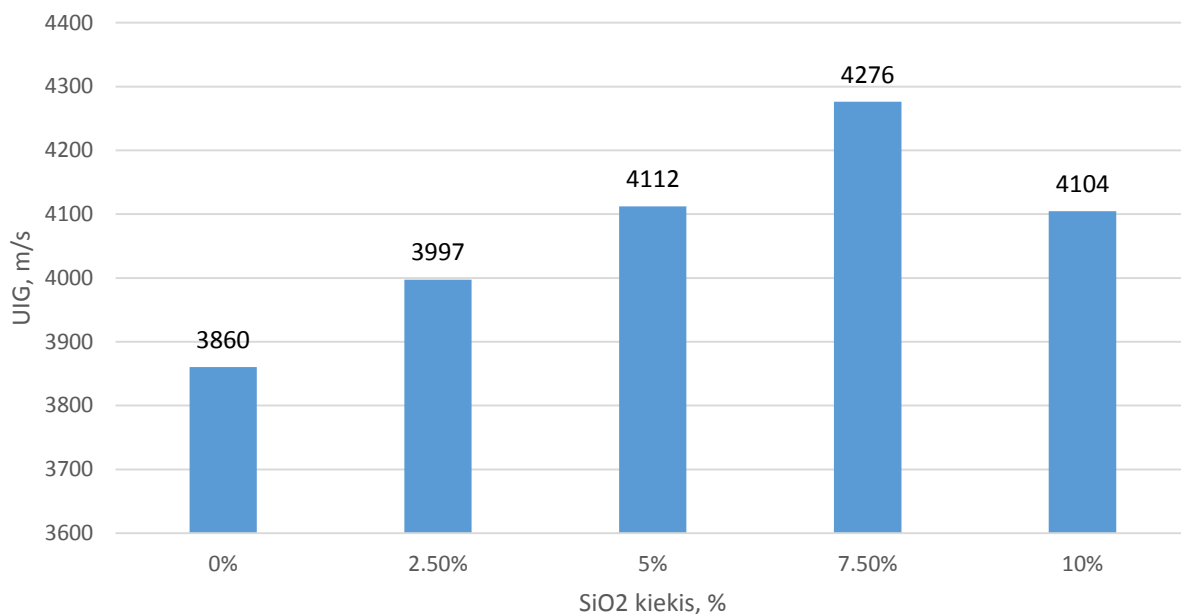
3.3 pav. Ultragarso impulso sklaidimo greičio ir SM priedo kiekio cementiniame akmenyje su CEM I 42,5 R priklausomybė po 7 parų kietėjimo

Bandiniams, kietėjusiems 28 paras, UIG kitimo tendencija išliko. Kontrolinių bandinių UIG siekė 4286 m/s, bandinių su 7,5 % SM priedu 4335 m/s (3.4 pav.). Nustatyta, kad visų bandinių, kietėjusių 28 paras, struktūriniai rodikliai pagerėjo, lyginant juos su kietėjusiais 7 paras.



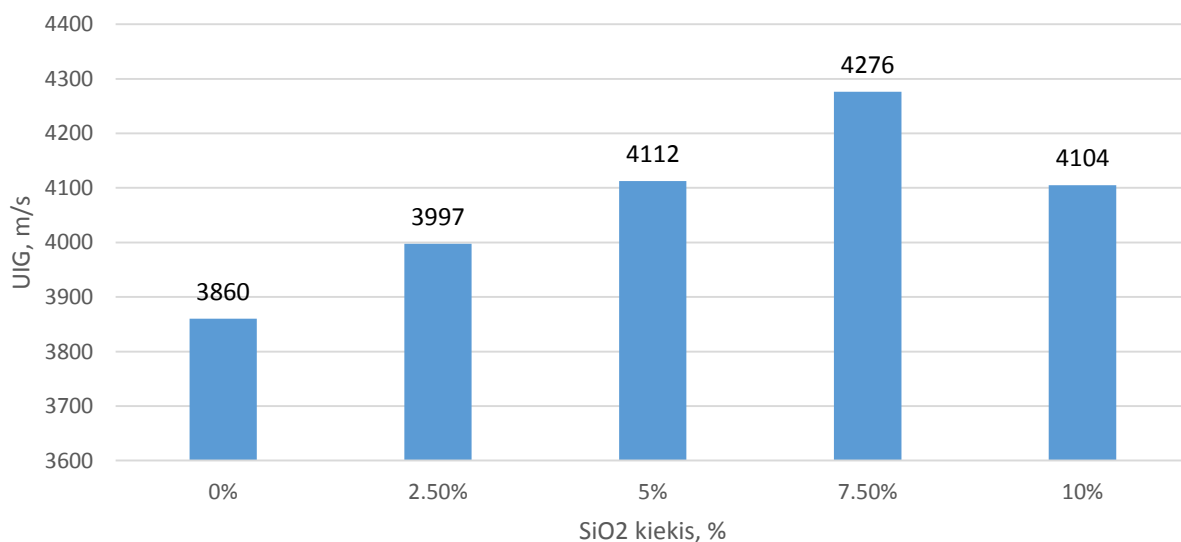
3.4 pav. Ultragarso impulso sklaidimo greičio ir SM priedo kiekio cementiniame akmenyje su CEM I 42,5 R priklausomybė po 28 parų kietėjimo

Bandiniams su CEM II A-V 52,5 N kietėjusiems 7 paras, UIG didėjo, SM priedo kiekį didinant iki 7,5 % ir siekė 4276 m/s, o kontrolinių bandinių 3860 m/s. SM kiekį didinant daugiau nei 7,5 % UIG sumažėjo iki 4311 m/s (3.5 pav.).



3.5 pav. Ultragarso impulso sklaidimo greičio ir SM priedo kiekio cementiniame akmenyje su CEM II A-V 52,5 N priklausomybė po 7 parų kietėjimo

Bandiniams, kietėjusiems 28 paras, UIG kitimo tendencija išliko. Kontrolinių bandinių UIG siekė 4180 m/s, bandinių su 7,5 % SM priedu 4303 m/s (3.6 pav.).

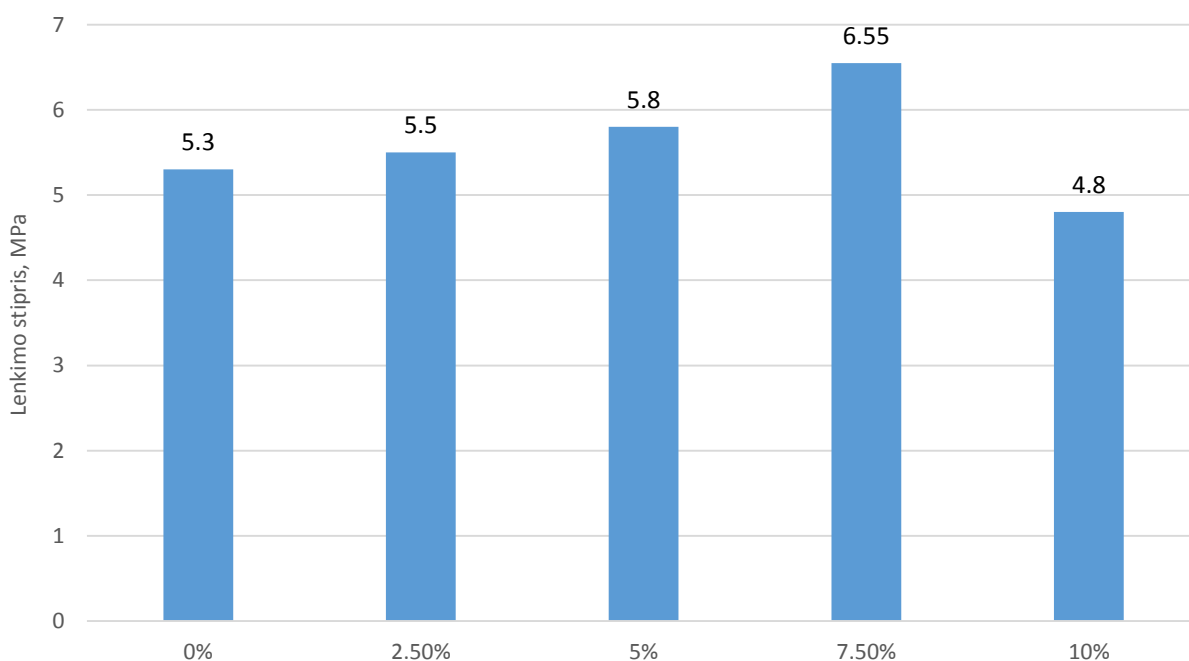


3.6 pav. Ultragarso impulso sklaidimo greičio ir SM priedo kiekio cementiniame akmenyje su CEM II A-V 52,5 N priklausomybė po 28 parų kietėjimo

3.3. Lenkimo stipris

Lenkimo stipris buvo nustatytas tiriamiesiems bandiniams su CEM I 42,5 R ir su CEM II A-V 52,5 N. Bandinių lenkimo stiprio ir silicio dioksido mikrodulkių kiekio priklausomybė po 7 kietėjimo parų pateikta 3.7 ir 3.8 paveiksluose. Kaip matyti iš pateiktų duomenų, cementinio akmens lenkimo stipris priklauso nuo įdėto SM kiekio.

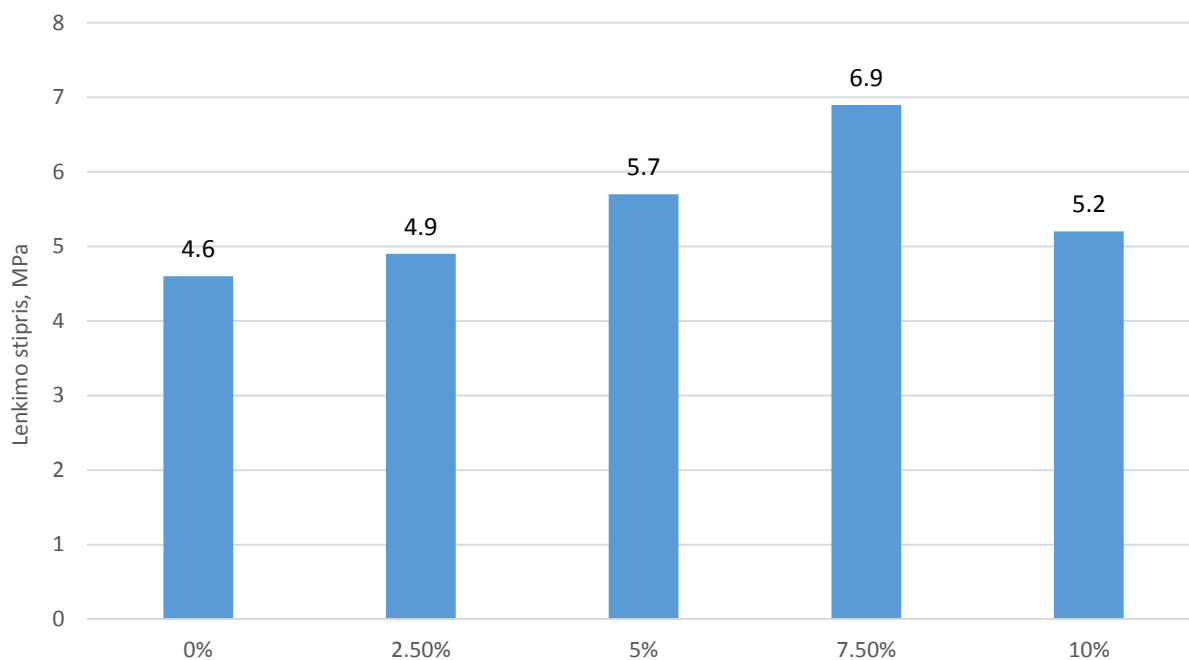
Kontroliniai bandiniai su CEM I 42,5 R ir be SM priedo, po 7 kietėjimo parų pasiekė 5,3 MPa lenkimo stipį. Didžiausią lenkimo stiprį turėjo bandiniai su 7,5 % SM priedu, šių bandinių vidutinis lenkimo stipris po 7 kietėjimo parų buvo 6,55 MPa ir siekė 19,1 % kontrolinių bandinių lenkimo stiprio. Iš paveikslo 3.7 taip pat galima matyti, jog, didinant SM kiekį iki 7,5 %, cementinio akmens lenkimo stipris tendencingai didėja, tačiau, padidinus priedo kiekį iki 10 % nuo cemento masės, cementinio akmens bandinių lenkimo stipris pradeda mažėti iki 4,8 MPa - tai yra 1,75 MPa arba 26,7 % mažiau nei bandinių su 7,5 % priedo.



3.7 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R lenkimo stipris po 7 kietėjimo parų

Kontroliniai bandiniai su CEM II A-V 52,5 N ir be SM priedo po 7 kietėjimo parų pasiekė 4,6 MPa lenkimo stipį. Šis rezultatas buvo mažiausias tarp visų tirtų bandinių. Didžiausią lenkimo stiprį turėjo bandiniai su 7,5 % SM priedu, šių bandinių vidutinis lenkimo stipris po 7 kietėjimo parų buvo 6,9 MPa ir siekė 150 % kontrolinių bandinių lenkimo stiprio. Iš paveikslo 3.7 taip pat galima matyti, jog, didinant SM kiekį iki 7,5 %, cementinio akmens lenkimo stipris tendencingai didėja, tačiau, padidinus priedo kiekį iki 10 % nuo cemento masės, cementinio akmens bandinių

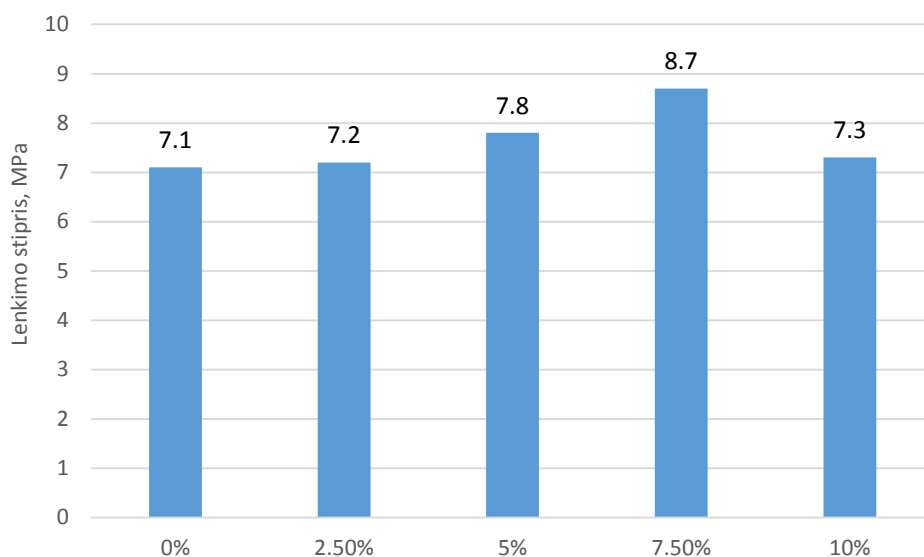
lenkimo stipris pradeda mažėti iki 5,2 MPa - tai yra 1,7 MPa mažiau nei bandinių su 7,5 % priedo, tačiau vis tiek 0,6 MPa arba 13 % daugiau nei kontrolinių bandinių be šio priedo.



3.8 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N lenkimo stipris po 7 kietėjimo parų

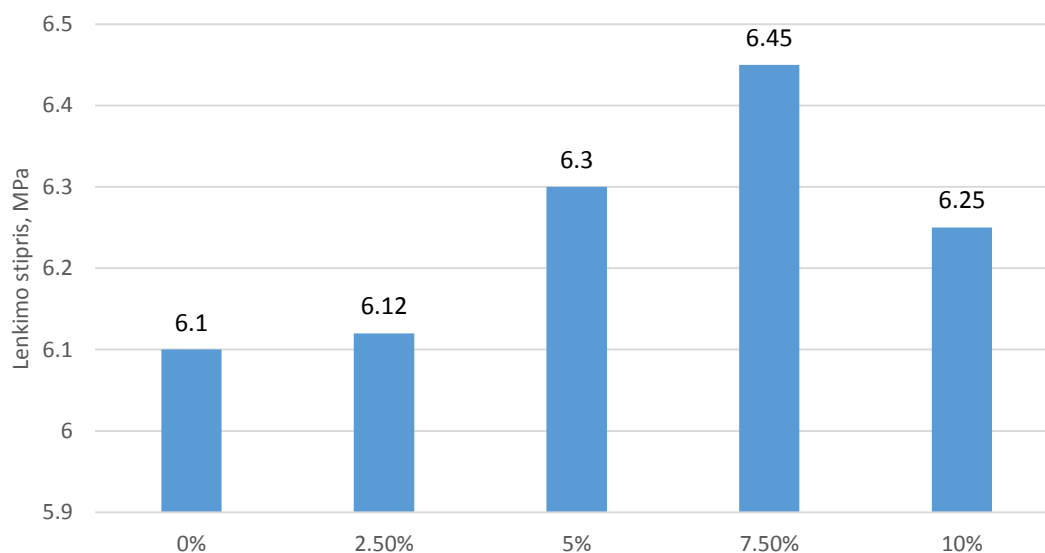
Suformuotiems bandiniams, atlikus lenkimo stiprio nustatymo tyrimus po 28 kietėjimo parų, buvo gauti rezultatai, kurie yra pateikti 3.9 ir 3.10 paveiksluose.

Bandiniuose su CEM I 42,5 R didžiausią lenkimo stiprį, kaip ir ankščiau atliktuose bandymuose po 7 kietėjimo parų, turėjo bandiniai su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 8,7 MPa, kas sudarė 122,5 % kontrolinių bandinių lenkimo stiprio vertės. Mažiausiu lenkimo stipriu pasižymėjo bandiniai be silicio dioksido mikrodulkių priedo ir siekė 7,1 MPa. Galima pastebėti, jog visi bandiniai su SM priedu turėjo didesnę lenkimo stiprį nei kontroliniai bandiniai be šio priedo. Lenkimo stipris bandinių su SM priedu buvo nuo 0,1 MPa iki 1,6 MPa didesnis nei bandinių be šio priedo po 28 kietėjimo parų.



3.9 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R lenkimo stipris po 28 kietėjimo parų

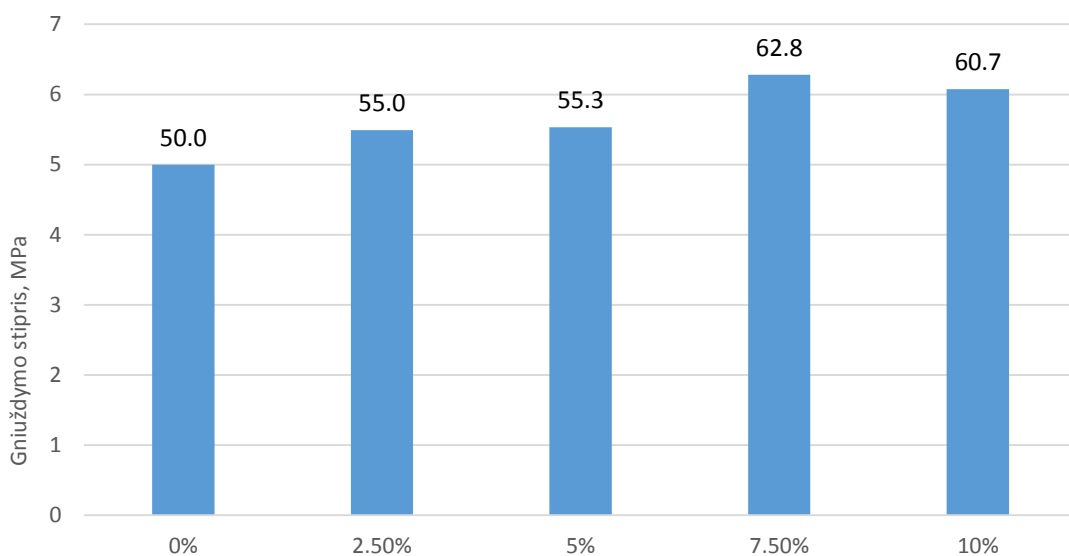
Bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N didžiausią lenkimo stiprį turėjo bandiniai su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 6,45 MPa, kas sudarė 105,7 % kontrolinių bandinių lenkimo stiprio vertės. Mažiausiu lenkimo stipriu pasižymėjo bandiniai be silicio dioksido mikrodulkių priedo ir siekė 6,1 MPa. Galima pastebėti, jog visi bandiniai su SM priedu turėjo didesnę lenkimo stiprį nei kontroliniai bandiniai be šio priedo. Lenkimo stipris bandinių su SM priedu buvo nuo 0,02 MPa iki 0,35 MPa didesnis nei bandinių be šio priedo po 28 kietėjimo parų.



3.10 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N lenkimo stipris po 28 kietėjimo parų

3.4. Gniuždymo stipris

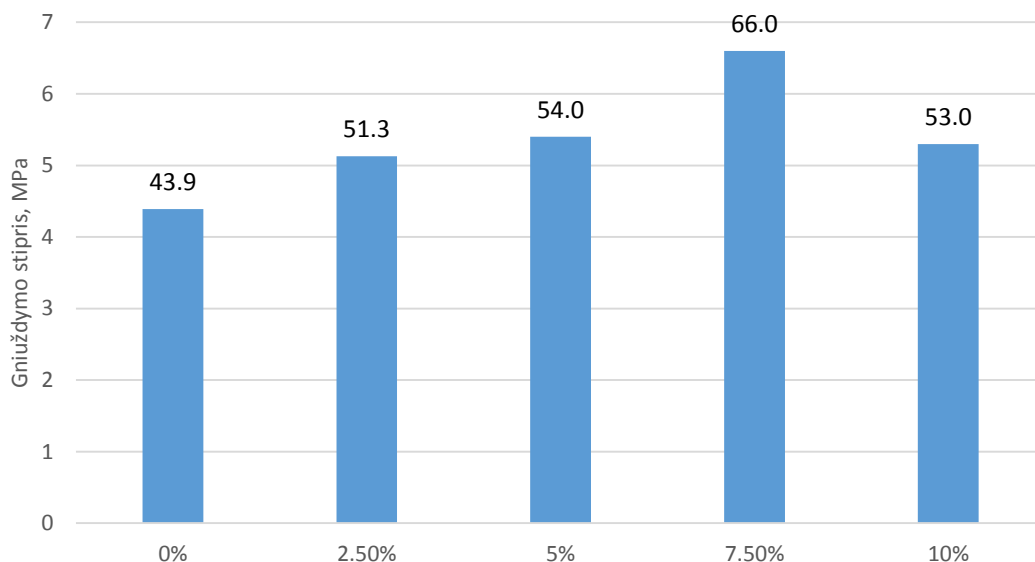
Gniuždymo stipris buvo nustatytas tiriamiesiems bandiniams su CEM I 42,5 R ir su CEM II A-V 52,5 N. Bandinių gniuždymo stiprio ir silicio dioksido mikrodulkių kiekio priklausomybė po 7 kietėjimo parų pateikta 3.11 ir 3.12 paveiksluose. Kaip matyti iš pateiktų duomenų, cementinio akmens gniuždymo stipris priklauso nuo įdėto SM kiekio. Kontroliniai bandiniai su CEM I 42,5 R ir be SM priedo po 7 kietėjimo parų pasiekė 50 MPa gniuždymo stiprį – svarbu pažymėti, jog šis rezultatas buvo mažiausias tarp visų tirtų bandinių. Didžiausią gniuždymo stiprį turėjo bandiniai su 7,5 % SM priedu, šių bandinių vidutinis gniuždymo stipris po 7 kietėjimo parų buvo 62,8 MPa ir siekė 125,6 % kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio. Nedaug nuo šių atsiliko bandiniai su 10 % SM priedu, kurių gniuždymo stipris siekė 60,7 MPa. Iš paveikslo 3.11 taip pat galima matyti, jog didinant SM kiekį iki 7,5 % cementinio akmens stiprumo savybės tendencingai didėja, tačiau padidinus priedo kiekį iki 10 % nuo cemento masės, cementinio akmens bandinių stiprumo savybės pradeda mažėti, o gniuždymo stipris krenta iki 60,7 MPa - tai yra 2,1 MPa mažiau nei bandinių su 7,5 % priedo, tačiau vis tiek 10,7 MPa arba 21,4 % daugiau nei kontrolinių bandinių be šio priedo.



3.11 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R gniuždymo stipris po 7 kietėjimo parų

Kontroliniai bandiniai su CEM II A-V 52,5 N ir be SM priedo po 7 kietėjimo parų pasiekė 43,90 MPa gniuždymo stiprį - šis rezultatas buvo mažiausias tarp visų tirtų bandinių. Didžiausią gniuždymo stiprį turėjo bandiniai su 7,5 % SM priedu, šių bandinių vidutinis gniuždymo stipris po 7 kietėjimo parų buvo 66 MPa ir siekė 120 % kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio. Iš 3.12 paveikslo nustatyta, kad didinant SM kiekį iki 7,5 % cementinio akmens stiprumo savybės

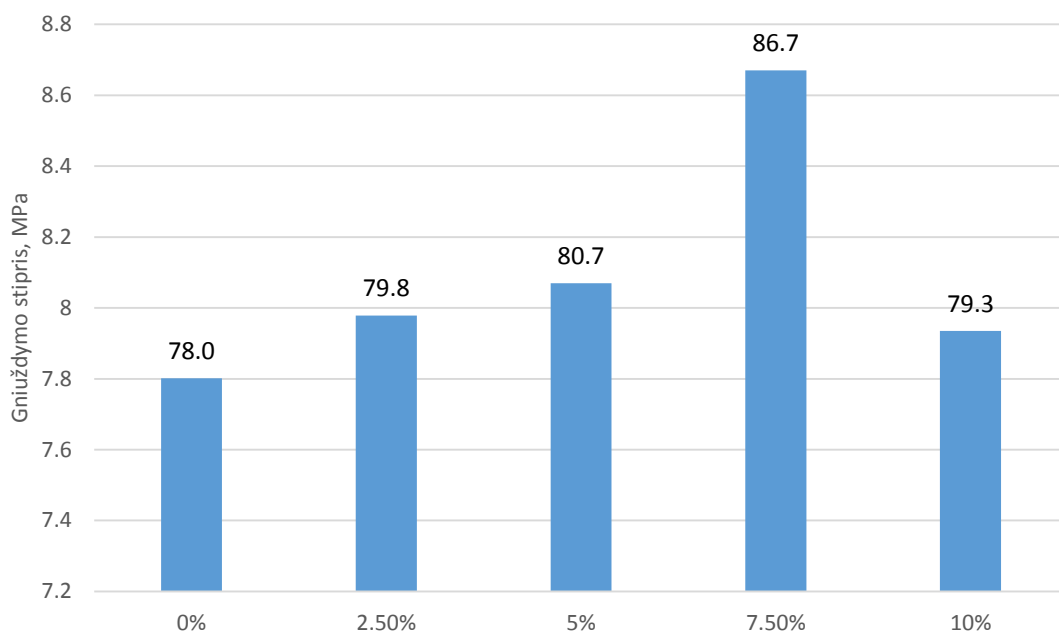
tendencingai didėja, tačiau padidinus priedo kiekį iki 10 % nuo cemento masės, cementinio akmens bandinių stiprumo savybės pradeda mažėti, o gniuždymo stipris mažėja iki 53,0 MPa - tai yra 13 MPa mažiau nei bandinių su 7,5 % priedo, tačiau vis tiek 9,1 MPa daugiau nei kontrolinių bandinių be šio priedo.



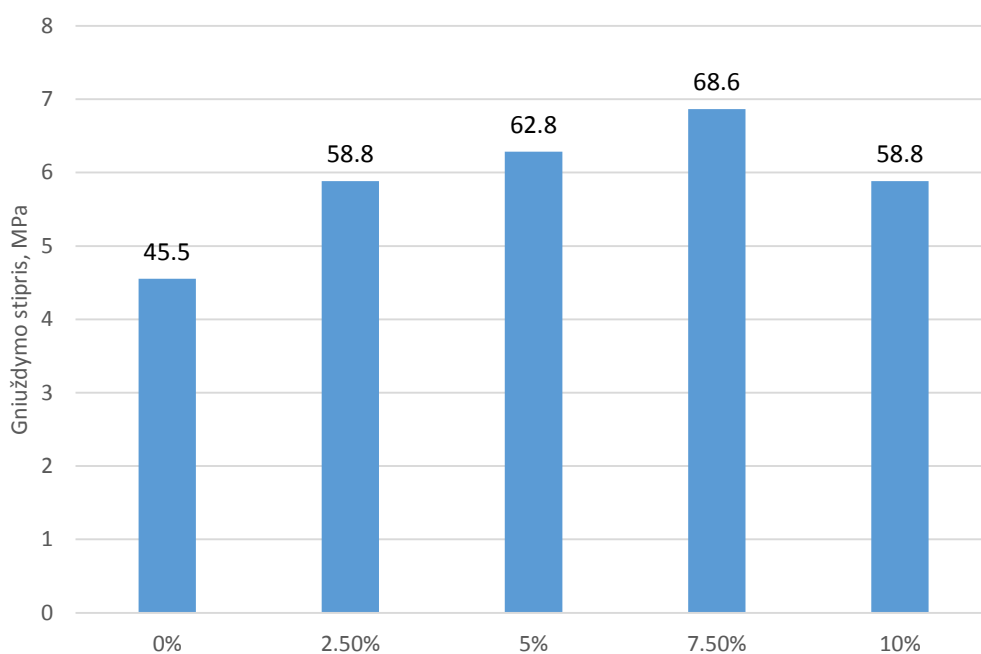
3.12 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N gniuždymo stipris po 7 kietėjimo parų

Suformuotiems bandiniams, atlikus gniuždymo stiprio nustatymo tyrimus po 28 kietėjimo parų, buvo gauti rezultatai, kurie yra pateikti 3.13 ir 3.14 paveiksluose. Bandiniuose su CEM I 42,5 R didžiausią gniuždymo stiprį, kaip ir anksčiau atliktuose bandymuose po 28 kietėjimo parų, turėjo bandiniai su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 86,7 MPa, kas sudarė 111 % kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio vertės. Mažiausiu gniuždymo stipriu, pasižymėjo bandiniai be silicio dioksido mikrodulkių priedo ir siekė 78 MPa. Galima pastebėti, jog visi bandiniai su SM priedu turėjo didesnę gniuždymo stiprį nei kontroliniai bandiniai be šio priedo.

Bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N didžiausią gniuždymo stiprį, turėjo bandiniai su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 68,6 MPa, kas sudarė 150 % kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio vertės. Mažiausiu gniuždymo stipriu pasižymėjo bandiniai be silicio dioksido mikrodulkių priedo ir siekė 45,5 MPa. Galima pastebėti, jog visi bandiniai su SM priedu turėjo didesnę gniuždymo stiprį nei kontroliniai bandiniai be šio priedo.



3.13 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R gniuždymo stipris po 28 kietėjimo parų

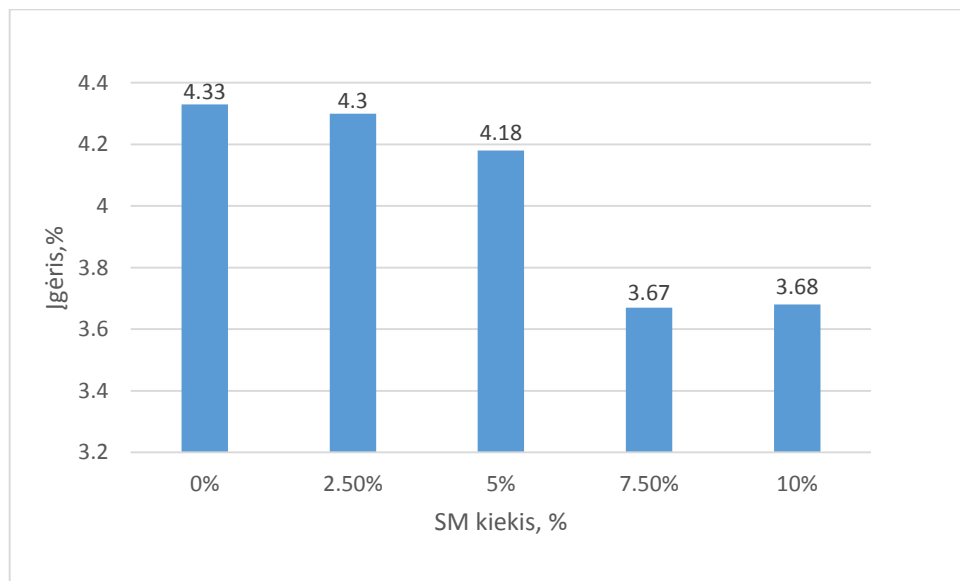


3.14 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N gniuždymo stipris po 28 kietėjimo parų

3.5. Vandens įgėris

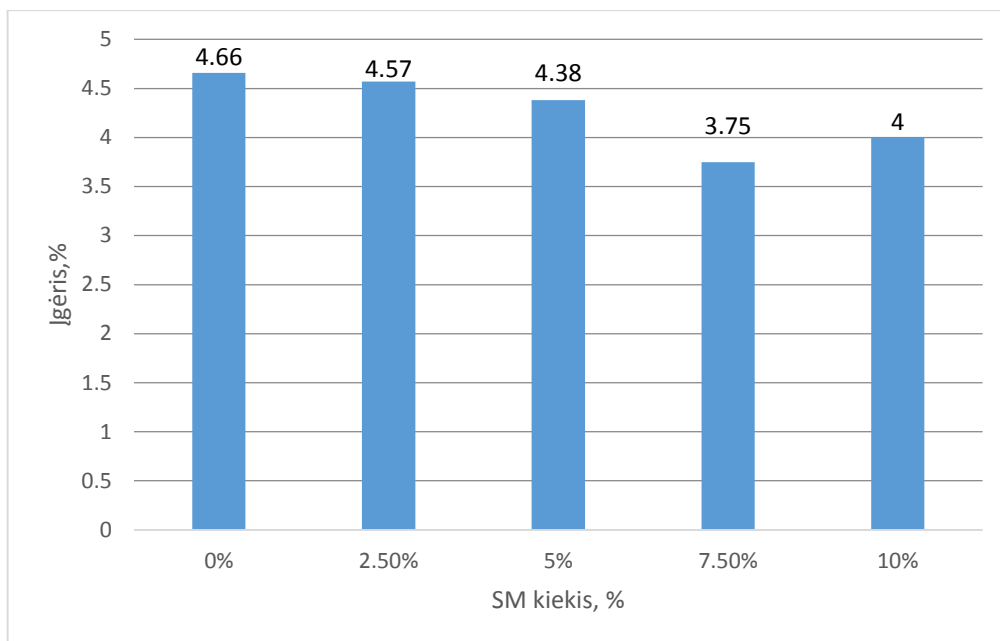
Atlikus vandens įgėrio nustatymo tyrimus su visiškai išdžiovintais cementinio akmens bandiniais buvo gauti rezultatai, kurie pateikti 3.15 ir 3.16 paveiksluose. Bandiniuose su CEM I

42,5 R galima matyti, kad įgėris mažėja bandiniuose didinant silicio dioksido mikrodulkių kiekį iki 7,5 % nuo cemento masės, o pridėjus daugiau kaip 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių įgėris pradeda didėti. Didžiausiu įgėriu 4,33 %, pasižymėjo kontroliniai bandiniai be silicio dioksido mikrodulkių priedo, o mažiausiu - bandiniai su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 3,67 %. Kaip matyti iš kitų atliktų tyrimų rezultatų bei grafikų, įgėrio rezultatai tiesiogiai susiję su bandinių tankio ir gniuždymo stiprio rezultatais. Didėjant cementinio akmens bandinių tankiui ir gniuždomajam stipriui mažėja jų įgėris.



3.15 pav. Bandinių su CEM I 42,5 N įgėrio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių kiekio

Bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N galima matyti, kad įgėris mažėja bandiniuose didinant silicio dioksido mikrodulkių kiekį iki 7,5 % nuo cemento masės, o pridėjus daugiau kaip 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių įgėris pradeda didėti. Didžiausiu įgėriu (4,66 %) pasižymėjo kontroliniai bandiniai be silicio dioksido mikrodulkių priedo, o mažiausiu - bandiniai su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 3,75 %.



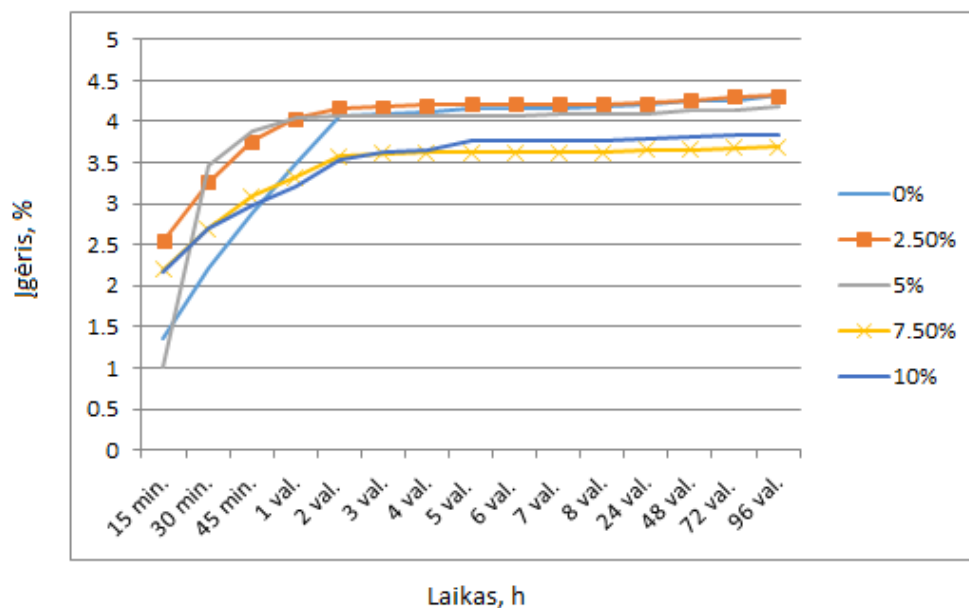
3.16 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N įgėrio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių kiekio

Atlikus tyrimus nustatyta, kad optimalus silicio dioksido mikrodulkių kiekis bandiniuose yra 7,5 %, nes šie bandiniai pasižymi mažiausiu įgėriu.

3.6. Vandens įgėrio kinetika

Atlikus vandens įgėrio kinetikos bandymus buvo gauti visų tiriamųjų bandinių rezultatai, kurie, naudojantis programa “Excel”, buvo apdoroti ir gautos įgėrio kinetikos reikšmės po 15 min., 30 min., 45 min., 1 val., 2 val., 3 val., 4 val., 5 val., 6 val., 7 val., 8 val., 24 val., 48 val., 72 val. ir 96 val. procentais, gauti duomenys pateikti 3.17 paveiksle. Cementinio akmens su CEM I 42,5 R bandinių vidutinis įgėris po 4 parų mirkymo vandenyje siekė nuo 3,69 % iki 4,33.

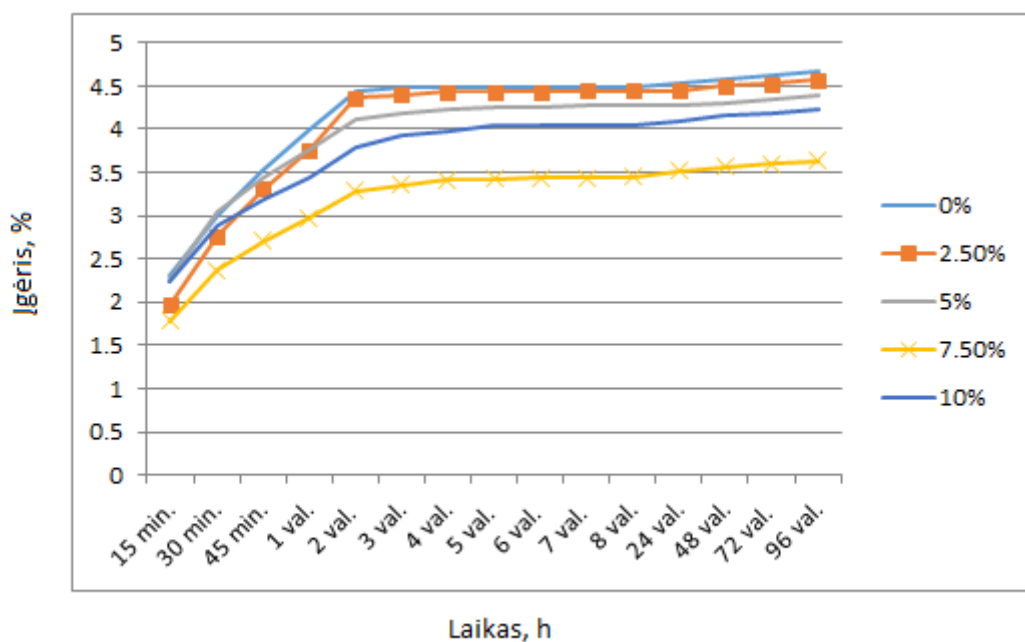
Mažiausiu įgėriu visą bandymų laikotarpį pasižymėjo bandiniai su 7,5 % SM priedu. Šių bandinių pradinis įgėris po 15 min. mirkymo vandenyje siekė 2,2 % ir per visą keturių parų bandymo laikotarpį padidėjo iki 3,69 % nuo bandinių masės. Tai atitinkamai buvo mažiausias įgėrio padidėjimas iš visų tirtų bandinių, kuris siekė 1,49 %.



3.17 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R įgėrio kinetikos priklausomybė nuo SM kiekio

Cementinio akmens su CEM II A-V 52,5 N bandinių vidutinis įgėris po 4 parų mirkymo vandenyje siekė nuo 3,63 % iki 4,66 %. Mažiausiu įgėriu visą bandymų laikotarpį pasižymėjo bandiniai su 7,5 % SM priedu. Šių bandinių pradinis įgėris po 15 min. mirkymo vandenyje siekė 1,77 % ir per visą keturių parų bandymo laikotarpį padidėjo iki 3,52 % nuo bandinių masės. Atitinkamai tai buvo mažiausias įgėrio padidėjimas iš visų tirtų bandinių, kuris siekė 1,75 % (3.18 pav.).

Atlikus tyrimą nustatyta, kad didinant SM kiekį bandiniuose iki 7,5 % įgėrio kinetikos rezultatai nuosekliai gerėja, įgėris mažėja, lyginant su atitinkamais bandiniais be SM priedo. Tam poveikį turėjo atviras cementinio akmens bandinių su atitinkamais SM priedo kiekiais poringumas, kuris, remiantis tolimesniais atliktais tyrimais, buvo mažesnis už kontrolinių bei kitų bandinių atvirojo poringumo rodiklius.

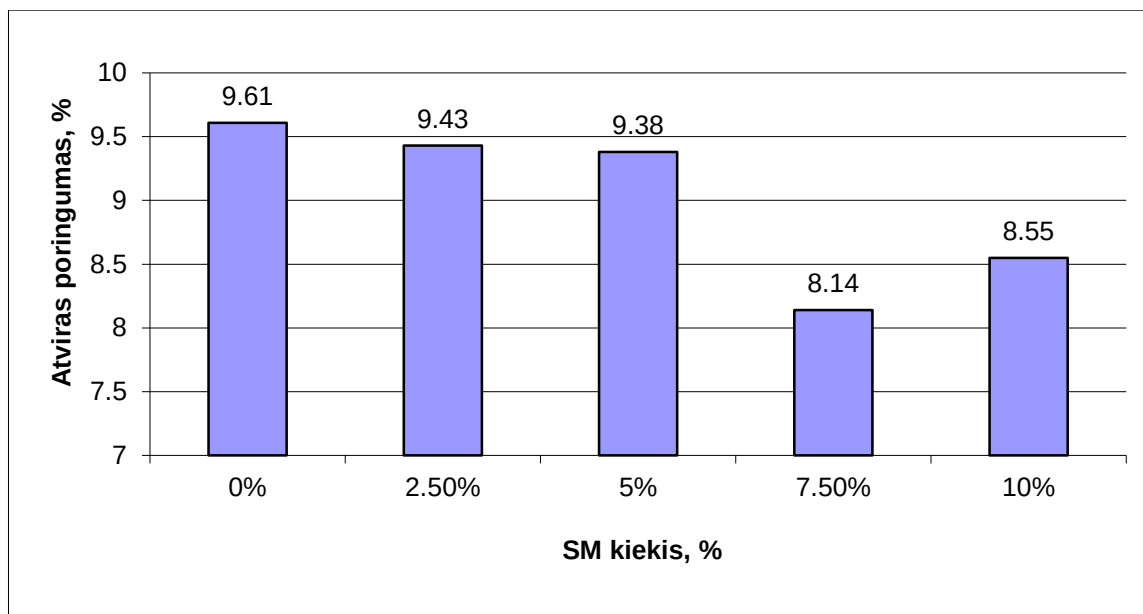


3.18 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N įgėrio kinetikos priklausomybė nuo SM kiekio

3.7. Medžiagos poringumo nustatymas

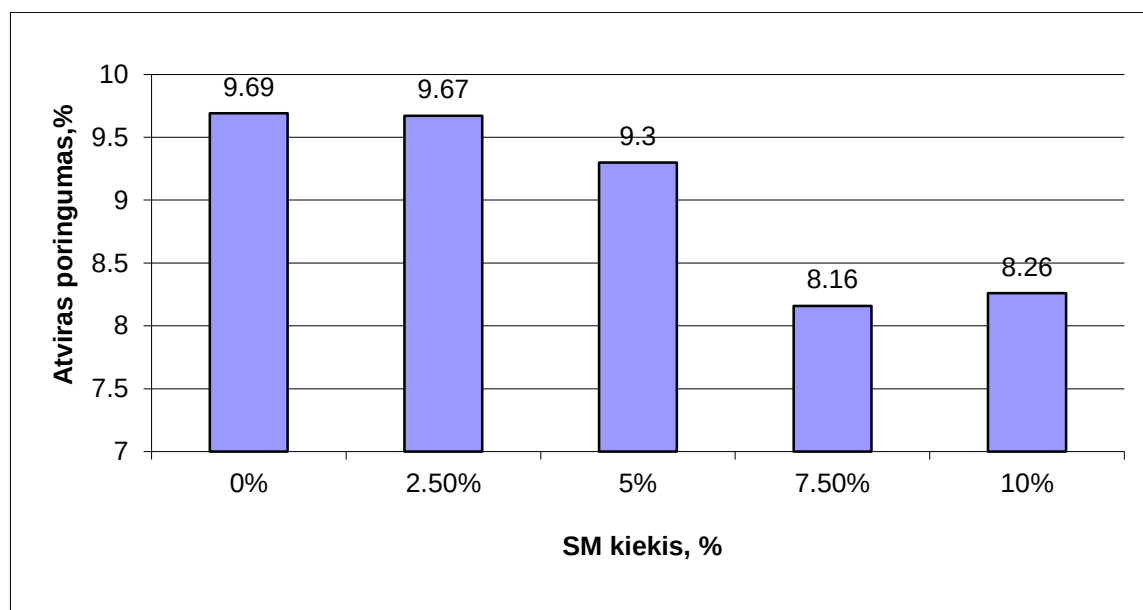
Medžiagos atviras ir uždaras poringumas buvo nustatomas norint prognozuoti cementinio akmens atsparumą šalčiui ciklais. Šiam tikslui bandiniai buvo išdžiovinti, susmulkinti ir nustatytas jų savitasis tankis.

Bandiniuose su CEM I 42,5 N mažiausią atvirą poringumą turėjo bandiniai su 7,5 % ir su 10 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė atitinkamai 8,14 % ir 8,55 %. Didžiausiu atviru poringumu pasižymėjo bandiniai be SM priedo ir siekė 9,61 %. Panašaus atviro poringumo buvo bandiniai su 2,5 % bei 5 % SM priedu (3.19 pav.)



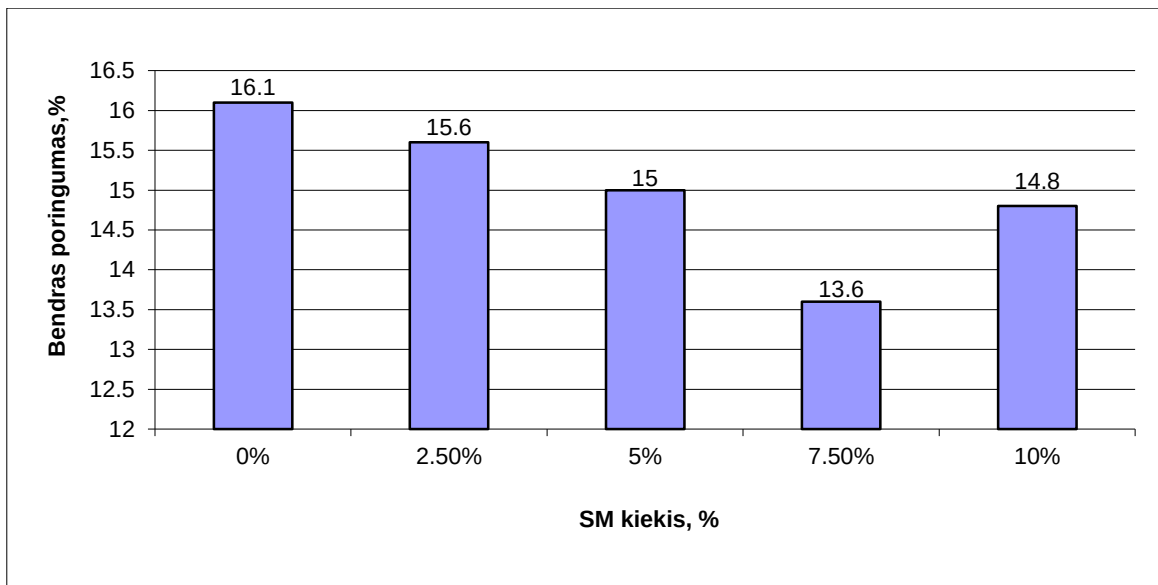
3.19 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R atviro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio

Bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N mažiausią atvirą poringumą turėjo bandiniai su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 8,16 % . Didžiausiu atviru poringumu pasižymėjo kontroliniai bandiniai be SM priedu ir siekė 9,69 % (3.20 pav.).



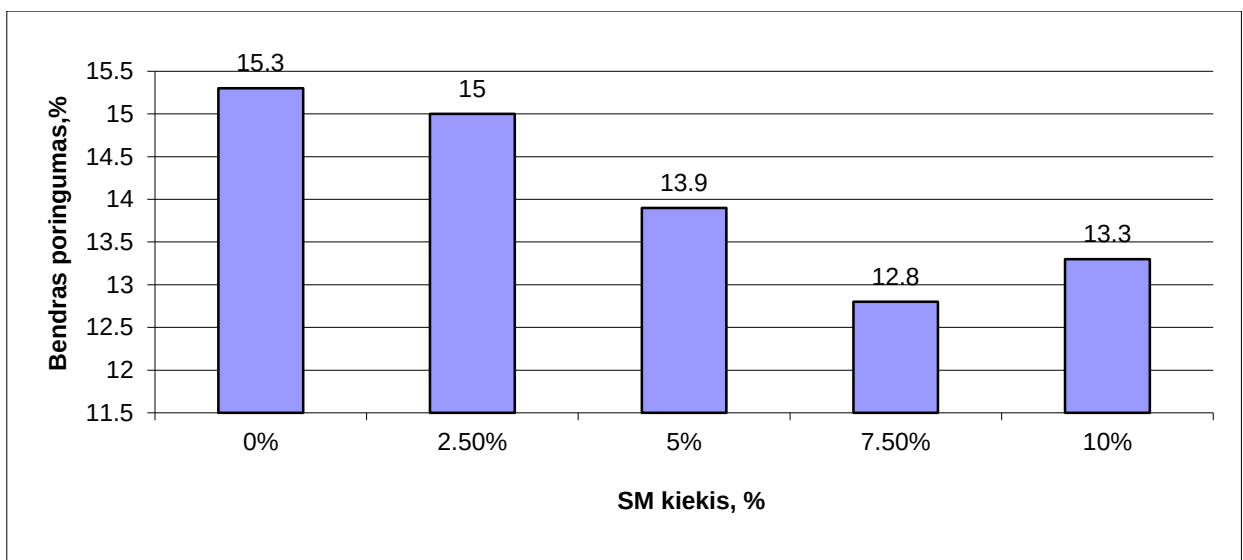
3.20 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 R atviro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio

Bandiniuose su CEM I 42,5 N mažiausią bendrą poringumą turėjo bandiniai su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 13,6 %. Didžiausiu bendruoju poringumu pasižymėjo kontroliniai bandiniai be SM priedo ir siekė 16,1 % (3.21 pav.).



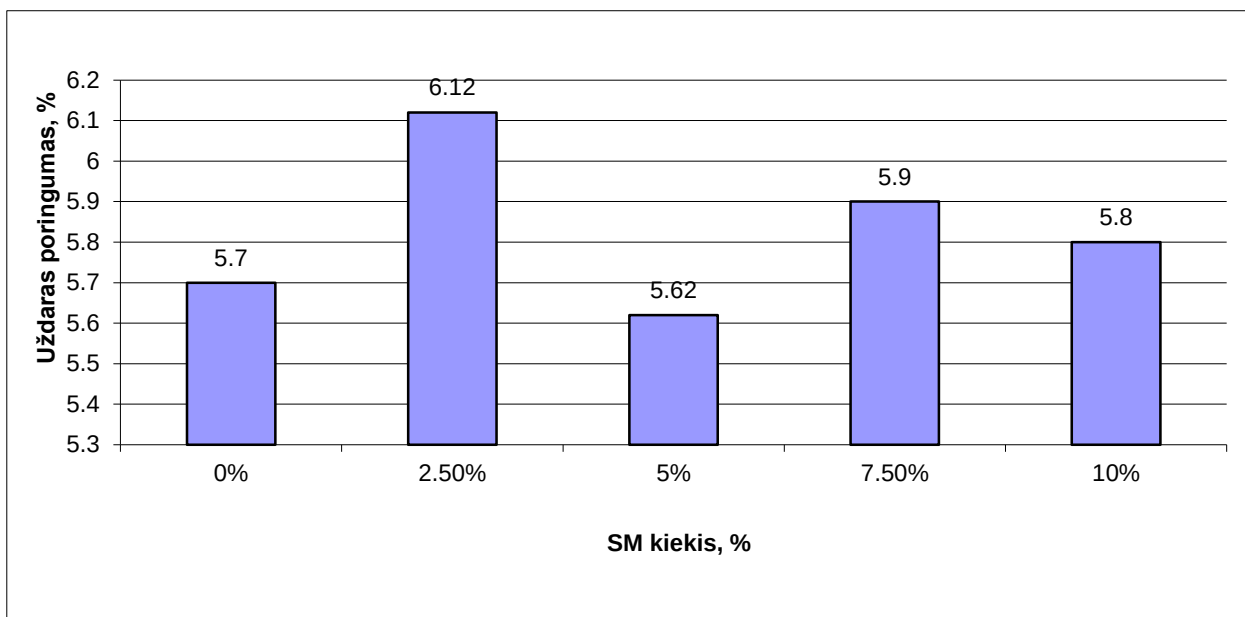
3.21 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R bendrojo poringumo priklausomybė nuo SM kiekio

Bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N mažiausią bendrąją poringumą turėjo bandiniai su 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 12,8 %. Didžiausiu bendrojo poringumu pasižymėjo kontroliniai bandiniai su 2,5 % SM priedo ir siekė 15,3 % (3.22 pav.).



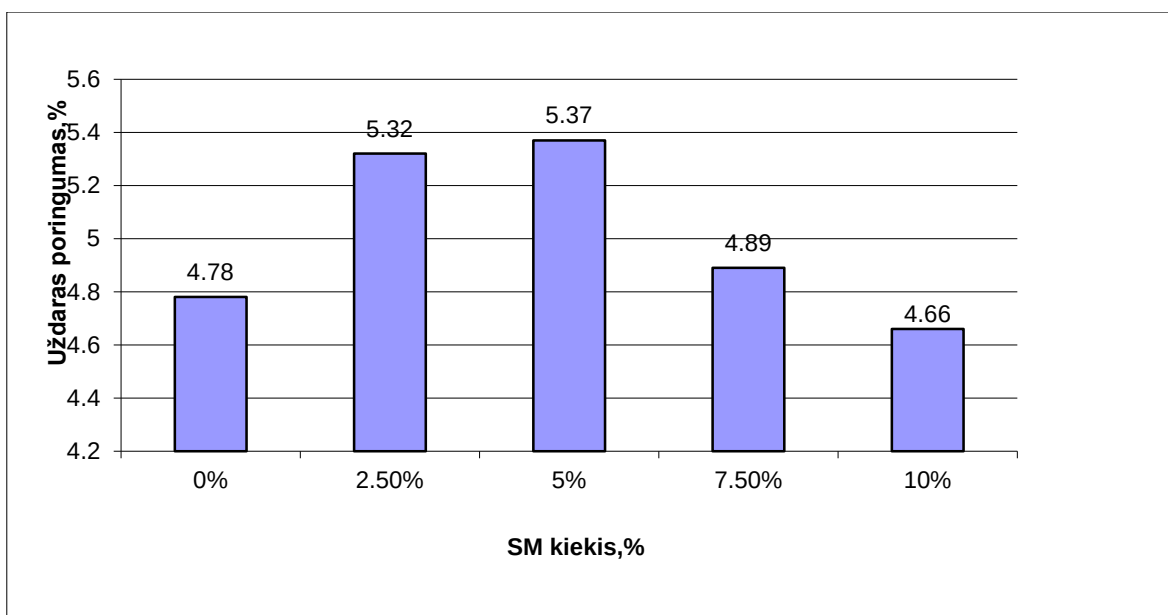
3.22 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N bendrojo poringumo priklausomybė nuo SM kiekio

Bandiniuose su CEM I 42,5 N mažiausią uždaro poringumą turėjo bandiniai su 5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu ir siekė 5,62 %. Didžiausiu uždaru poringumu pasižymėjo bandiniai su 2,5 % SM priedo ir siekė 6,12 % (3.23 pav.).



3.23 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R uždaro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio

Bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N mažiausią uždarą poringumą turėjo bandiniai su 10 % SM priedo ir siekė 4,66. Didžiausiu uždaru poringumu pasižymėjo bandiniai su 5 % SM priedo ir siekė 5,37 % (3.24 pav.).



3.24 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N uždaro poringumo priklausomybė nuo SM kiekio

3.8. Prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais

Atlikus cementinio akmens vandens įgėrio tyrimus, nustačius atvirą, bendrą ir uždarą jų poringumą bei tankį ir savitąjį tankį, skaičiavimais buvo nustatytas atsparumo šalčiui kriterijus K_f , kurio vertės pateiktos 3.1 ir 3.2 lentelėse.

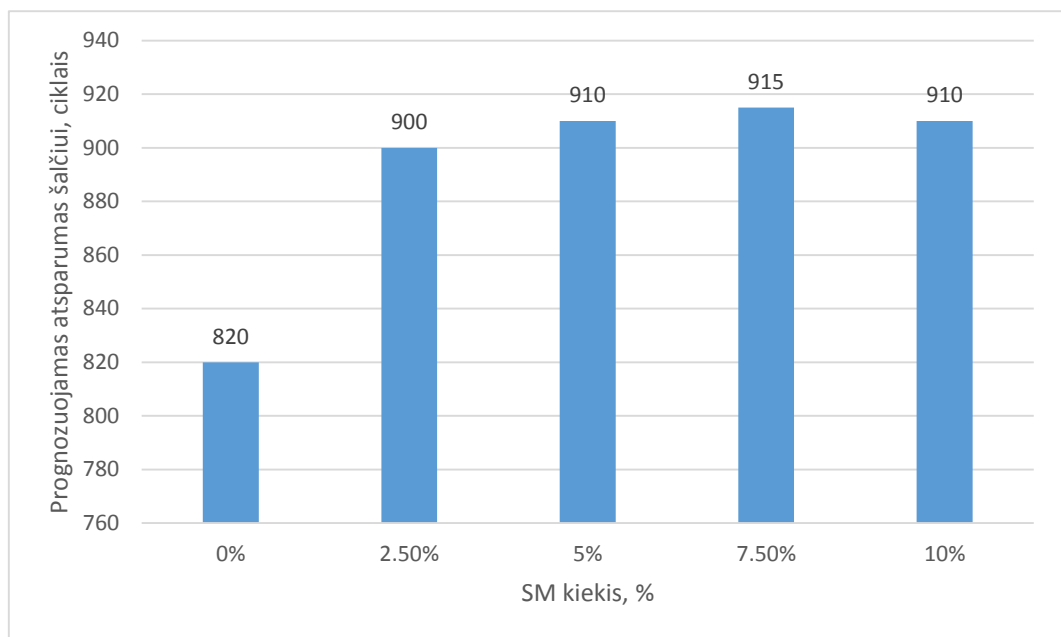
3.1 lentelė. Kriterijaus K_f vertės, kai naudojamas CEM I 42,5 R

SM kiekis %	K_f	Prognozuojamas ciklų skaičius
0	6,6	820
2,5	7,2	900
5	7,5	910
7,5	8,1	915
10	7,5	910

3.2 lentelė. Kriterijaus K_f vertės, kai naudojamas CEM II A-V 52,5 N

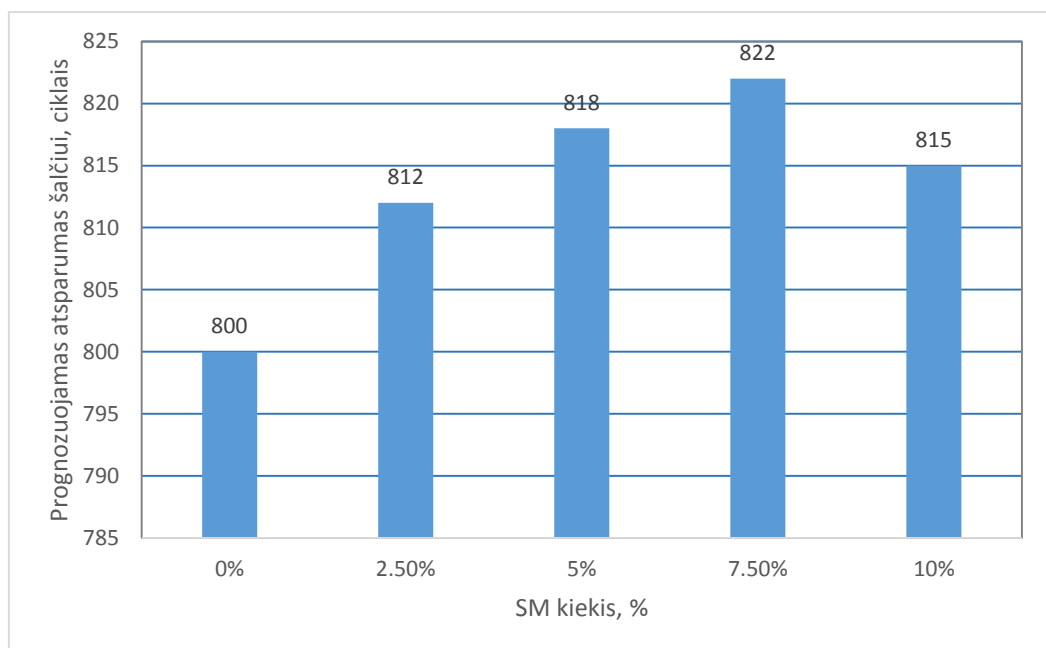
SM kiekis %	K_f	Prognozuojamas ciklų skaičius
0	5,5	800
2,5	6,12	812
5	6,4	818
7,5	6,7	822
10	6,3	815

Prognozuojamas atsparumas šalčiui pagal užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičių bandiniuose su CEM I 42,5 R didėjo, didinant SM kiekį bandiniuose iki 7,5 % ir pasiekė 915 ciklų, tačiau padidinus SM kiekį iki 10 % prognozuojamų atsparumo šalčiui ciklų skaičius pradėjo mažėti. Mažiausias ciklų skaičius buvo kontroliniuose bandiniuose be SM priedo ir siekė 800 ciklų (3.25 pav.).



3.25 pav. Prognozuojamo atsparumo šalčiui ciklais priklausomybė nuo SM kiekio su CEM I 42,5 R

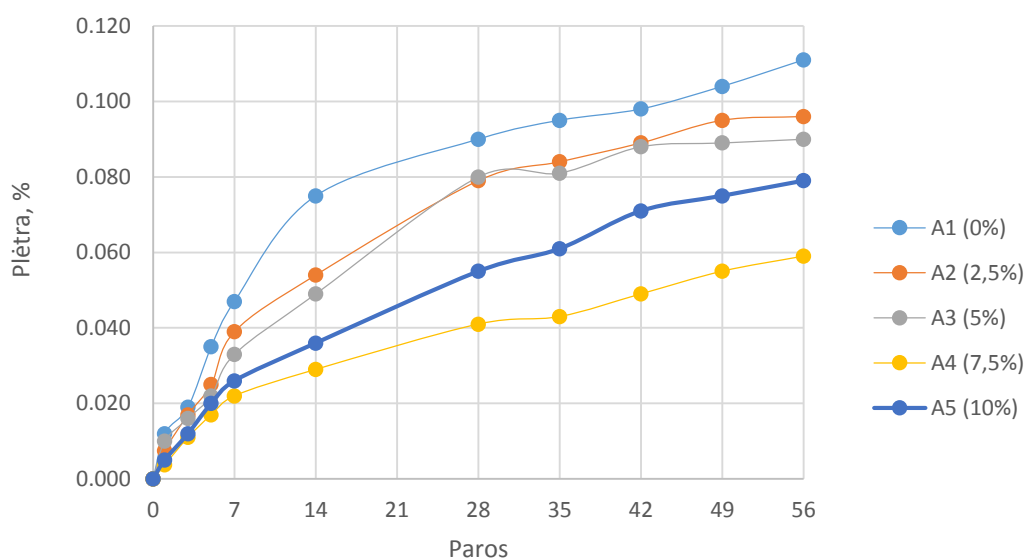
Prognozuojamas atsparumas šalčiui pagal užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičių bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N didėjo, didinant SM kiekį bandiniuose iki 7,5 % ir pasiekė 822 ciklų, tačiau padidinus SM kiekį iki 10 % prognozuojamų atsparumo šalčiui ciklų skaičius pradėjo mažėti. Mažiausias ciklų skaičius buvo kontroliniuose bandiniuose be SM priedo ir siekė 820 ciklų (3.26 pav.).



3.26 pav. Prognozuojamo atsparumo šalčiui ciklais priklausomybė nuo SM kiekio su CEM II A-V 52,5 N

3.9. Cementinio akmens šarminės korozijos tyrimo rezultatai

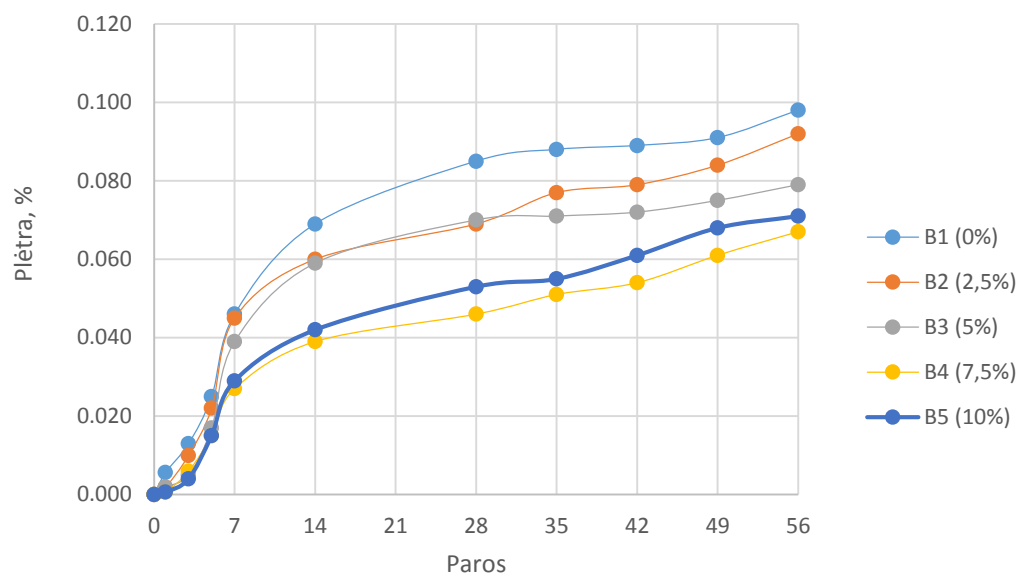
Tyrimų su cementu CEM I 42,5 R rezultatai pateikti 3.27 paveiksle. Bandinių šarminės korozijos tyrimai su skirtingu SM kiekiu parodė, kad mažiausia bandinių su CEM I 42,5 R plėtra po 56 parų išlaikymo 1 M NaOH tirpale buvo su 7,5 % SM priedu ir siekė 0,059 %. Didžiausia plėtra po 56 parų buvo bandiniuose be SM priedo ir siekė 0,111%.



3.27 pav. Bandinių su CEM I 42,5 R plėtra

Bandinių su CEM II-V 52,5 N mažiausia plėtra po 56 parų išlaikymo 1 M NaOH tirpale buvo su 7,5 % SM priedu ir siekė 0,067 %. Didžiausia plėtra po 56 parų buvo bandiniuose be SM priedo ir siekė 0,098 % (3.28 pav.).

Iš paveikslų matome, kad skiediniuose naudojant SM mikrodulkes ir smėlio užpildą šarminė korozija nepasireiškia. Tačiau reikia pažymėti, kad naudojant kitus užpildus, kurie gali būti reaktyvūs, SM mikrodulkių kiekis, stabdantis šarminę koroziją, dar turi būti ištirtas.



3.28 pav. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N plėtra

IŠVADOS

Atlikus tyrimus buvo nustatyta, kad cementinio akmens bandinių savybės tiesiogiai susijusios su į mišinį įdėtų silicio dioksido mikrodulkių kiekiu, kuris pakeitė atitinkamą dalį cemento.

Nustatyta, kad bandinių su CEM I 42,5 R tankis didėjo, didinant SM kiekį iki 7,5 %, ir siekė $2,331 \text{ g/cm}^3$, o kontrolinio bandinio be SM priedo tankis siekė $2,168 \text{ g/cm}^3$ - tai sudaro 7 % skirtumą. Bandinių su CEM II A-V 52,5 N tankis didėjo, didinant SM kiekį iki 7,5 %, ir siekė $2,178 \text{ g/cm}^3$, o kontrolinio bandinio be SM priedo tankis siekė $2,080 \text{ g/cm}^3$ - tai sudaro 4,5 % skirtumą.

Darbe nustatyta, kad didžiausias ultragarso impulso slidimo greitis po 7 ir 28 kietėjimo parų cementiniame akmenyje su CEM I 42,5 R buvo pasiektas bandiniuose su 7,5 % SM priedu, pakeitusiu cemento dalį cementiniame akmenyje. Jis siekė 4136 m/s ir 4335 m/s, atitinkamai siekė 110,7 % ir 101,1 % kontrolinių bandinių UIG, kuris po 7 kietėjimo vandenyje parų siekė 3985 m/s, o po 28 parų – 4286 m/s.

Didžiausias ultragarso impulso slidimo greitis po 7 ir 28 kietėjimo parų cementiniame akmenyje su CEM II A-V 52,5 N buvo pasiektas bandiniuose su 7,5 % SM priedu, pakeitusiu cemento dalį cementiniame akmenyje. Jis siekė 4276 m/s ir 4303 m/s, atitinkamai siekė 103,7 % ir 102,9 % kontrolinių bandinių UIG, kuris po 7 kietėjimo vandenyje parų siekė 3860 m/s, o po 28 parų – 4180 m/s.

Atlikus bandymus nustatyta, kad didžiausios cementinio akmens su CEM I 42,5 R bandinių lenkimo stiprio vertės po 7 ir 28 kietėjimo parų buvo pasiektos bandinių su 7,5 % SM priedu, pakeitusiu cemento dalį cementiniame akmenyje, jos siekė 6,55 MPa ir 8,7 MPa, atitinkamai 123,6 % ir 122,5 % kontrolinių bandinių lenkimo stiprio, kuris po 7 kietėjimo vandenyje parų siekė 5,3 MPa, o po 28 parų – 7,1 MPa.

Cementinio akmens su CEM II A-V 52,5 N bandinių didžiausios lenkimo stiprio vertės po 7 ir 28 kietėjimo parų buvo pasiektos bandinių su 7,5 % SM priedu, pakeitusiu cemento dalį cementiniame akmenyje, jos siekė 6,45 MPa ir 6,9 MPa, atitinkamai 140,2 % ir 113,1 % kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio, kuris po 7 kietėjimo vandenyje parų siekė 4,6 MPa, o po 28 parų – 6,1 MPa.

Atlikus bandymus buvo nustatyta, kad didžiausios cementinio akmens su CEM I 42,5 R bandinių gniuždymo stiprio vertės po 7 ir 28 kietėjimo parų buvo pasiektos bandinių su 7,5 % SM

priedu, pakeitusiu cemento dalį cementiniame akmenyje. Jos siekė 62,8 MPa ir 86,7 MPa, atitinkamai 125,6 % ir 111 % kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio, kuris po 7 kietėjimo vandenyje parų siekė 50 MPa, o po 28 parų - 78 MPa.

Cementinio akmens su CEM II A-V 52,5 N bandinių didžiausios gniuždymo stiprio vertės po 7 ir 28 kietėjimo parų buvo pasiektos bandinių su 7,5 % SM priedu, pakeitusiu cemento dalį cementiniame akmenyje, jos siekė 66 MPa ir 68,6 MPa, atitinkamai 120,7 % ir 138 % kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio, kuris po 7 kietėjimo vandenyje parų siekė 43,9 MPa, o po 28 parų – 45,5 MPa.

Nustatyta, kad mažiausią vandens įgėrį bandiniai su CEM I 42,5 R po 4 mirkymo parų turėjo bandiniai su 7,5 % SM priedu. Jis siekė 3,67 % , o didžiausią - bandiniai be SM priedo, jų įgėris siekė 4,33 %. Mažiausią vandens įgėrį bandiniai su CEM II A-V 52,5 N po 4 mirkymo parų pasiekė bandiniai su 7,5 % SM priedu, jis siekė 3,75 % , o didžiausią - bandiniai be SM priedo, jų įgėris siekė 4,66 %.

Prognozuojamas atsparumas šalčiui pagal užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičių bandiniuose su CEM I 42,5 R didėjo, didinant SM kiekį bandiniuose iki 7,5 % ir pasiekė 915 ciklų, tačiau padidinus SM kiekį iki 10 % prognozuojamų atsparumo šalčiui ciklų skaičius pradėjo mažėti. Mažiausias ciklų skaičius buvo kontroliniuose bandiniuose be SM priedo ir siekė 800 ciklų. Prognozuojamas atsparumas šalčiui pagal užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičių bandiniuose su CEM II A-V 52,5 N didėjo, didinant SM kiekį bandiniuose iki 7,5 % ir pasiekė 822 ciklų, tačiau padidinus SM kiekį iki 10 % prognozuojamų atsparumo šalčiui ciklų skaičius pradėjo mažėti. Mažiausias ciklų skaičius buvo kontroliniuose bandiniuose be SM priedo ir siekė 820 ciklų.

Bandinių šarminės korozijos tyrimai su skirtingu SM kiekiu parodė, kad mažiausia bandinių su CEM I 42,5 R plėtra po 56 parų išlaikymo 1 M NaOH tirpale buvo su 7,5 % SM priedu ir siekė 0,059 %, bandinių su CEM II A-V 52,5 N mažiausia plėtra po 56 parų išlaikymo 1 M NaOH tirpale irgi buvo su 7,5% SM priedu ir siekė 0,067 %.

LITERATŪRA

- Bache H. H. Cement-bound materials with extremely high strength and durability, Concrete, 1981. Trondheim, 32 p.
- Brouxel M. The alkali-aggregate reaction rim: Na₂O, SiO₂, K₂O and CaO chemical distribution. Cement and Concrete Research. 1993. Vol. 23. P. 309-320.
- CR 1901:1995. Regional Specification and Recommendation for the evidence of damaging alkali silica reactions in concrete.
- Dent Glaser L., Kataoka N. On the role of calcium in the alkaliaggregate. Cement and Concrete Research. 1982. Vol. 12. P. 321-331.
- E. Ivanauskas, A. Grinys, A.A. Navickas, A. Augonis. Betono su lietuvs karjerų užpildais šarminės korozijos tyrimai ir šio reiškinio prevencinių priemonių metodikos sukūrimas. Tiriamojo darbo tarpinė ataskaita. 2014. P. 3-4
- Fournier B., Bérubé M. A., Folliard K. J., Thomas M. Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali- Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures. U.S. Department of Transportation. 2010.
- Gengying, L. 2004. *Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂*. Cement and concrete research. 34(6): 1043-1049.
- Gumuliauskas A., Navickas A., Štuopys A. SiO₂ mineralų struktūrinės būsenos įtaka užpildų reaktyvumui. Statyba. 1996. Nr.3 (7). P. 46–53.
- Kičaitė, A. 2009. *Medžiagotyra statybinės medžiagos*. Vilnius: Technika. 129 p.
- Kičaitė, A.; Mačiulaitis, R. *Neorganinių rišamųjų medžiagų ir užpildų tyrimo metodai*. Laboratoriniai darbai. Vilnius: Technika, 2001. 70 p.
- Lane D. S., Ozyldirim C. Preventive measures for alkali-silica reactions (binary and ternary systems). Cement and concrete research. 1999. Vol. 29. P. 1281–1288.
- Laukaitis A., Kerienė J. Kligys M. Mikulskis D. Lekūnaitė L. Amorfinio nanodispersinio SiO₂ priedo poveikis autoklavinių akytųjų betonų struktūros susidarymui ir savybėms. „Medžiagotyra“ Vol. 16, No. 3. 2010;

- Lesnicki k. J., Jin-Yeon K., Kurtis K.E., Jacobs L.J. Assessment of alkali–silica reaction damage through quantification of concrete nonlinearity. *Materials and Structures*, Vol. 46, 2013. Pp.497–509
- Lesnicki k. J., Jin-Yeon K., Kurtis K.E., Jacobs L.J. Assessment of alkali–silica reaction damage through quantification of concrete nonlinearity. *Materials and Structures*, Vol. 46, 2013. Pp.497–509
- Lindgård, J.; Andiç-Çakir, Ö.; Fernandes, I.; Rønning, T. F.; Thomas, M. D. A. 2012. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing, *Cement and Concrete Research* 42: 223–243.
- Marfilil S.A., Maiza P.J. Deteriorated pavements due to alkali-silica reaction. A petrographic study of three cases in Argentina. *Cement and concrete research*. 2001. Vol. 31. P. 1017–1023.
- Martusevicius, M.; Kaminskas, R.; Mituzas, J. A. 2002. *Rišamųjų medžiagų technologija*. Kaunas: Technologija. 208 p.
- Myhre B. Microsilica in refractory castables. How does microsilica quality influence performance? In 9-th Biennial Worldwide Congress of refractories, 2005, p 191-195
- Nagrockienė, D.; Žurauskienė, R.; Mačiulaitis, R.; Kičaitė, A.; Gailius, A.; Červokienė, A. 2010. *Medžiagų mokslas, laboratorinių darbų metodikos nurodymai*. Vilnius: Technika. 122p.
- Naujokaitis, A. 2007. *Statybinės medžiagos. Betonai*. Vilnius: Technika. 358 p.
- Rutkauskas Aurimas, Girskas Giedrius Lietuvos karjerų užpildų poveikio betono šarminei korozijai tyrimai. *Mokslas – Lietuvos Ateitis*. 2015. P. 551–556
- Shannag, M.J. 2000. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume, *Cement and concrete composites* 22: 399–406.
- Silica Fume in Concrete, (Interaktyvus). (Žiūrėta 2017- 05-10). Prieiga per internetą: < www.silicafume.org/media/sfa_ch1.ppt >
- Skipkiūnas, G. 2007. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*. Kaunas: Vitae Litera. 336 p.
- Stanton T.E. The expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.* 1940. Vol. 66. P. 1781–1811.

- Turanli L., Shomglin K., Ostertag C.P., Monteiro P.J. M. Reduction in alkali-silica expansion. Cement and concrete research. 1999. Vol. 29. P. 1281–1288.
- Užpildų šarminės korozijos tyrimai. KTU Statybinių medžiagų katedra. Mokslinių tyrimų ataskaita, 1991.
- Vektaris, B.; Vilkas, V. 2006. *Betono tvarumas*: monografija. Kaunas. 162 p.
- Vekteris B., Vilkas V. BETONO TVARUMAS. Betono sulfatinė ir šarminė korozija, atsparumas šalčiui ir karbonizacijai. Tyrimai ir prevencinės priemonės. Monografija, Kaunas, Technologija. 162 p.
- Wang H., Gillot J. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. Cement and Concrete Research. 1991. Vol. 21, N 4. 647-654.
- Zdenek P. Bažant, Alexander Steffens. Mathematical model for alkalisilica reactions in concrete. Cement and concrete research. 2000. Vol. 30. P. 419–428.
- Zelic, J.; Krstulovic, R.; Tkalcec, E.; Krolo, P. 2000. *Properties of Portland cement-limestone-silica fume mortars*. Cem. Concr. Res., 30(1): 145-152.
- Žurauskienė, R.; Nagrockienė, D.; Mačiulaitis, R.; ir kt. 2009. *Statybinės medžiagos laboratorinių darbų metodiniai nurodymai*. Vilnius: Technika. 166 p.
- Žurauskienė, R.; Nagrockienė, D.; Mačiulaitis, R. ir kt. 2005. *Medžiagų mokslas*. Vilnius: Technik. 100 p.
- Žurauskienė, R.; Naujokaitis, A. P.; Mačiulaitis, R.; Žurauskas, R. 2012. *Statybinės medžiagos*. Vilnius: Technika. 540 p.
- Бенштейн Ю., Ершова Л., Панина Н. Роль кремнеземистой добавки в предотвращении внутренней коррозии бетона. ЖПХ, 1985. № 6. С. 1308-1312.