



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Šarmu aktyvuota porėta kompozitinė medžiaga

Baigiamasis magistro projektas

Tomas Jaskaudas

Projekto autorius

Prof. dr. Danutė Vaičiukynienė

Vadovė

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Šarmu aktyvuota porėta kompozitinė medžiaga

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6121EX008)

Tomas Jaskaudas

Projekto autorius

Prof. dr. Danutė Vaičiukynienė

Vadovė

Doc. dr. Rėda Bistrickaitė

Recenzentė

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Tomas Jaskaudas

Šarmu aktyvuota porėta kompozitinė medžiaga

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tomo Jaskaudo, baigiamasis projektas tema „Šarmu aktyvuota porėta kompozitinė medžiaga“ 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.

Tomas Jaskaudas

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
ŠARMU AKTYVUOTA PORĖTA KOMPOZITINĖ MEDŽIAGA

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.: 2020 m. lapkričio 30d. Nr. V25-09-18

(lietuvių k.):
ŠARMU AKTYVUOTA PORĖTA KOMPOZITINĖ MEDŽIAGA

(anglų k.):
ALKALI ACTIVATED POROUS COMPOSITE MATERIAL

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	x
Analitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Skaitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:

Vadovas: Prof. dr. Danutė Vaičiukynienė parašas
(indėlis 90 %) *pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas: lekt. Jūratė Mockienė parašas
(indėlis 10%) *pareigos, vardas, pavardė*

Studentas: Tomas Jaskaudas parašas
vardas, pavardė

Jaskaudas, Tomas. Šarmu aktyvuota porėta kompozitinė medžiaga. Magistro baigiamasis projektas / vadovė prof. dr. Danutė Vaičiukynienė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: porėta kompozitinė medžiaga, šarmas, šlakas, fosfogipsas, pramoninės atliekos, aliuminio ir silicio junginiai.

Kaunas, 2021. 59 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame darbe šarmu aktyvuojamos ir analizuojamos Suomijos metalurgijos pramonėje išgauto šlako ir AB „Lifosa“ gamykloje susidarančio fosfogipso atliekos. Tiriamos jų sudėtys, fizikinės savybės, tarpusavio sąveika hidratacijos metu ir antrinio panaudojimo galimybės. Siekiama sukurti porėtą, atsparią aukštai temperatūrai kompozitinę medžiagą, kurią būtų galima pritaikyti statybų sektoriuje kaip tvarią izoliacinę medžiagą. Tiriamojo darbo tikslas yra ištirti porėtą, šarmu aktyvuotą kompozitinę medžiagą, panaudojant aliumosilikatinius pramonės šalutinius produktus.

Baigiamajame darbe atliekama literatūros analizė, kurioje aprašoma: šarmais aktyvuojamų medžiagų aktualumas, šarminio aktyvavimo principas, medžiagų elgsena aukštoje temperatūroje, kietėjimo ir poringumo didinimo procesai bei medžiagų pritaikomumo galimybės. Sudaroma tyrimų metodologija, kurioje aprašomi baigiamajame darbe taikyti tyrimų metodai, jų tikslingumas ir parinkimo logika. Aptariami tyrimų rezultatai ir nustatomos jų tarpusavio priklausomybės. Rezultatai aprašomi remiantis 5-ių skirtingų medžiagos sudėčių tyrimais: gniuždomuoju stiprumu po 3 parų kietėjimo, gniuždomuoju stiprumu po 28 parų kietėjimo, oro porų pasiskirstymo skerspjūvyje, šiluminio laidumo savybėmis, tankio ir gniuždomojo stiprumo rodikliais po 200, 400, 600 ir 800 °C temperatūros poveikio. Remiantis gautais rezultatais, rekomenduojamas fosfogipso kiekis šarmu aktyvuotos medžiagos sudėtyje 3–5 %, dėl optimalaus mechaninių, šilumos laidumo ir atsparumo aukštai temperatūrai savybių pasiskirstymo.

Magistro baigiamojo darbo struktūra:

- lentelių skaičius – 9 vnt.
- paveikslų skaičius – 46 vnt.
- literatūros šaltinių skaičius – 49 vnt.

Jaskaudas, Tomas. Alkali Activated Porous Composite Material. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Danutė Vaičiukynienė; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: porous composite material, alkali, slag, phosphogypsum, waste materials, aluminum and silicon compounds.

Kaunas, 2021. 59 pages.

Summary

In the master's thesis, slag and phosphogypsum waste were activated and analyzed using alkali activation process. These by-products were generated at the *Lifosa* AB plant and the Finnish metallurgical industry. Their compositions, physical properties, interactions during hydration and reusability were investigated. The purpose was to create a porous, high temperature resistant composite material that can be used in the construction sector as a sustainable insulating material. The aim of the research is to investigate a porous, alkali-activated composite material using aluminosilicate industrial by-products.

The final work includes an analysis of the literature, which describes the relevance of alkali-activated materials, the principle of alkali activation process, the impact of high temperature to material, hardening and porosity-enhancing processes, and the applicability of materials. A research methodology is developed, which describes the research methods used in the master's thesis, their expediency, and the logics of selection. The results of the research are discussed, and the interdependencies of the properties are determined. The results are described based on compositional studies of 5 different materials: compressive strength after 3-day hardening, compressive strength after 28-day hardening, air pore cross-sectional distribution, thermal conductivity properties, density, and compressive strength after the impact of 200, 400, 600 and 800 °C temperature. Based on the obtained results, the recommended content of phosphogypsum in the alkali-activated material is 3-5%, due to the optimal distribution of mechanical, thermal conductivity and high temperature resistance properties.

The master's thesis includes:

- total number of tables – 9.
- total number of pictures – 46.
- total number of literature sources – 49.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas	12
1. Literatūros apžvalga	14
1.1. Temos aktualumas	14
1.2. Šarminio aktyvavimo principas ir pagrindinės medžiagų savybės.....	16
1.2.1. Akmens anglies pelenai	17
1.2.2. Šlakas.....	18
1.2.3. Metakaolinas.....	18
1.3. Šarmu aktyvuotų medžiagų elgsena aukštose temperatūrose.....	20
1.4. Šarmu aktyvuotų medžiagų kietėjimo procesas	22
1.5. Šarmu aktyvuotų medžiagų poringumo didinimas.....	23
1.6. Šarmu aktyvuotų medžiagų pritaikymas	25
1.7. Literatūros apžvalgos apibendrinimas	28
2. Tyrimų metodologija	29
2.1. Tyrimo metodai	29
2.1.1. Rentgenostruktūrinė analizė (XRD)	29
2.1.2. Rentgeno spindulių dispersijos fluorescencijos analizė (XRF).....	29
2.1.3. Skenuojanti elektroninė mikroskopija (SEM)	29
2.1.4. Granulimetrinė analizė	29
2.1.5. Specifinio paviršiaus ploto nustatymo metodas	30
2.1.6. Atsparumo aukštai temperatūrai bandymas.....	30
2.1.7. Gniuždomojo stiprumo savybių nustatymas	30
2.1.8. Oro porų pasiskirstymo skerspjūvyje nustatymas	30
2.1.9. Šiluminio laidumo koeficiento nustatymas	30
2.2. Tyrime naudotos medžiagos	30
2.2.1. Vanduo	30
2.2.2. Natrio hidroksidas (NaOH)	31
2.2.3. Vandenilio peroksidas (H ₂ O ₂)	31
2.2.4. Metalurginis šlakas	31
2.2.5. Fosfogipsas	33
3. Rezultatai ir diskusija	36
3.1. Šarmu aktyvuotos medžiagų sudėtys ir paruošimas	36
3.2. Šarmu aktyvuotos medžiagos savybės, po 3 parų kietėjimo	39
3.2.1. Tankis ir gniuždomasis stiprumas	39
3.3. Šarmu aktyvuotos medžiagos savybės, po 28 parų kietėjimo	41
3.3.1. Tankis ir gniuždomasis stiprumas	41
3.3.2. Porėtos šarmu aktyvuotos medžiagos mineralinė sudėtis, po 28 parų kietėjimo	42
3.3.3. Oro porų pasiskirstymas skerspjūvyje.....	43
3.3.4. Šiluminio laidumo savybės.....	47
3.3.5. Aukštos temperatūros įtaka bandinių tankio ir gniuždomojo stiprumo savybėms.....	49
3.3.6. Šarmu aktyvuotos medžiagos mineralinė sudėtis, po aukštos temperatūros poveikio	51
Išvados	54
Literatūros sąrašas	55

Priedai.....	60
1 priedas. Šarmu aktyvuotos medžiagos bandinių išsipūtimas.....	60

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Portlandcemenčio ir šarmu aktyvuotų medžiagų palyginimas	15
2 lentelė. Metalurginio šlako XRD rentgenogramos suvestinė.....	32
3 lentelė. Metalurginio šlako cheminė sudėtis, remiantis XRF analize	32
4 lentelė. Fosfogipso XRD rentgenogramos suvestinė	34
5 lentelė. Fosfogipso cheminė sudėtis, remiantis XRF analize.....	35
6 lentelė. Baigiamajame darbe analizuojamų mišinių sudėtys.....	37
7 lentelė. Baigiamajame darbe analizuojamų mišinių sudėčių tūrinė išėiga.....	37
8 lentelė. XRD rentgenogramos suvestinė	43
9 lentelė. XRD rentgenogramose vyraujančių mineralų suvestinė, po aukštų temperatūrų poveikio	53

Paveikslų sąrašas

1 pav. Šarminio aktyvavimo procesas.....	17
2 pav. Iš anksto įtempto gelžbetonio traukinių pabėgiai[42].....	25
3 pav. Gelžbetoninis pėsčiųjų takas[42].....	26
4 pav. Šarmu aktyvuoto porėto betono kubelio 2D ir 3D projekcijos [39].....	26
5 pav. Šarmu aktyvuoto metalurginio šlako betonas panaudotas daugiabučio laikančiosiose konstrukcijose[1].....	27
6 pav. Perdangos plokštės pagamintos iš šarmu aktyvuotų medžiagų montavimas [43].....	27
7 pav. Queensland'o klimato kaitos instituto pastatas Australijoje [43].....	28
8 pav. Metalurginio šlako SEM nuotrauka	32
9 pav. Metalurginio šlako XRD rentgenograma	32
10 pav. Metalurginio šlako granulimetrinė sudėtis	33
11 pav. Fosfogipso SEM nuotrauka	34
12 pav. Fosfogipso XRD rentgenograma.....	34
13 pav. Fosfogipso granulimetrinė sudėtis.....	35
14 pav. Baigiamajame darbe naudojamos medžiagos: 1-šlakas, 2-fosfogipsas, 3-granuliuotas natrio šarmas (NaOH), 4-vanduo (H ₂ O), 5 – vandenilio peroksidas (H ₂ O ₂).....	36
15 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos gamybos technologija.....	38
16 pav. Tankio ir fosfogipso kiekio mišinyje priklausomybė, po 3 parų kietėjimo.....	39
17 pav. Gniuždomojo stiprumo ir fosfogipso kiekio mišinyje priklausomybė, po 3 parų kietėjimo.....	39
18 pav. Tankio ir gniuždomojo stiprumo priklausomybė, po 3 parų kietėjimo	40
19 pav. Gniuždomojo stiprumo nustatymo įranga	40
20 pav. Tankio ir fosfogipso kiekio mišinyje priklausomybė, po 28 parų kietėjimo.....	41
21 pav. Gniuždomojo stiprumo ir fosfogipso kiekio mišinyje priklausomybė, po 28 parų kietėjimo	41
22 pav. Tankio ir gniuždomojo stiprumo priklausomybė, po 28 parų kietėjimo	42
23 pav. Porėtos šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 28 parų kietėjimo	42
24 pav. Oro porų pasiskirstymo skerspjūvyje nustatymo principinė schema	43
25 pav. Sudėties Nr. 1 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros.....	44
26 pav. Sudėties Nr. 1 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %	44
27 pav. Sudėties Nr. 2 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros.....	44
28 pav. Sudėties Nr. 2 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %	45
29 pav. Sudėties Nr. 3 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros.....	45
30 pav. Sudėties Nr. 3 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %	45
31 pav. Sudėties Nr. 4 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros.....	46
32 pav. Sudėties Nr. 4 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %	46
33 pav. Sudėties Nr. 5 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros.....	46
34 pav. Sudėties Nr. 5 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %	47
35 pav. Šiluminio laidumo koeficiento nustatymui naudoti bandiniai	47

36 pav. Medžiagos šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo fosfogipso kiekio medžiagos mišinyje	48
37 pav. Oro porų pasiskirstymas bandiniuose, %	48
38 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos bandinių kaitinimas krosnelėje „SNOL 1,6.2,5./11-13“	49
39 pav. Gniuždomojo stiprumo priklausomybė nuo fosfogipso kiekio, kaitinant 200–800 °C temperatūrose.....	50
40 pav. Tankio priklausomybė nuo fosfogipso kiekio mišinyje, kaitinant 200–800 °C temperatūrose	50
41 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 200 °C temperatūros.....	51
42 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 400 °C temperatūros.....	52
43 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 600 °C temperatūros.....	52
44 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 800 °C temperatūros.....	53
45 pav. Šviežiai suformuoti skirtingų sudėčių šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos bandiniai	60
46 pav. Skirtingų sudėčių šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos bandiniai, po suformavimo praėjus 15min.....	60

Ivadas

Pasaulinės populiacijos skaičiui drastiškai augant, vis dažniau keliami tvarių medžiagų panaudojimo galimybių klausimai, siekiant užtikrinti technologinį ir aplinkosauginį vystymąsi statybų sektoriuje. Statybinių medžiagų gamyboje naudojami įspūdingi kiekiai natūralių žemės resursų ir išskiriami dideli kiekiai aplinkai kenksmingų produktų kiekvienais metais. Remiantis portlandcemenčio gamybos pavyzdžiu, puikiai galima suvokti panaudojamų resursų ir išskiriamų šalutinių produktų mastą, kadangi pagaminti 1 toną įprasto portlandcemenčio reikalinga: 1,7 tonos žaliavos, 1 tonos anglies ir 100 kWh elektros energijos, o į atmosferą išskiriama 0,8–1,0 tonos CO₂. Vertinant globaliu mastu, cemento pramonės išskiriamas anglies dioksido kiekis sudaro iki 8 % bendro žmonijos išskiriamo CO₂ kiekio [1]. Cemento gamybos industrijos ir individualių mokslininkų užduotis – sumažinti išskiriamų kenksmingų šalutinių produktų kiekius, panaudojant alternatyvias medžiagas ir naujas gamybos technologijas. Šiomis dienomis taikomas dalinis klinkerio pakeitimas įdėtinėmis medžiagomis, tokiomis kaip lakieji pelenai ir granuluotas aukštakrosnių šlakas, taip sumažinant degimo proceso metu išskiriamo CO₂ kiekį. Taip pat didelio pasaulio mokslininkų susidomėjimo sulaukė portlandcemenčio atsisakymo galimybė, o kaip alternatyvą panaudoti šarmais aktyvuotas aliuminio ir silicio junginių prisotintas medžiagas: granuluotą šlaką, pelenus ar metakaoliną [2].

Šarminį medžiagų aktyvavimą galima apibūdinti kaip procesą, kurio metu stiprios koncentracijos šarminis tirpalas yra sumaišomas su aliumosilikatine žaliava. Reakcijos produktas apibūdinamas kaip „gruntinis cementas“, geopolimeras, neorganinis polimeras ar tiesiog šarmu aktyvuota medžiaga. 1950 metais Glukhovsky buvo pirmasis mokslininkas, kuris aprašė šarminio aktyvavimo procesą panaudojant aukštakrosnių šlaką kaip rišamąją medžiagą, o 1979 metais J. Davidovits užpatentavo geopolimerinio cemento sąvoką [1]. Remiantis šių mokslininkų darbais, šarmais aktyvuojamos medžiagos yra aktyviai analizuojamos ir aprašomos šių dienų tyrėjų, kadangi pritaikymo aktualumas tampa vis labiau svarbus šiandieniniame pasaulyje. Mokslinėje literatūroje šarminio aktyvavimo procesą, kai panaudojami pelenai, šlakas ar metakaolinas, priskiria prie vieno iš efektyviausių cementinių medžiagų gamybos technologijų CO₂ emisijos atžvilgiu. Remiantis medžiagos gyvavimo ciklo analize, šarmu aktyvuotos cementinės medžiagos globalinio atšilimo potencialas yra ~55–75 % mažesnis, nei cementinių medžiagų, kuriose naudojamas įprastas portlandcementis. Globalinio atšilimo potencialo rodikliai priklauso nuo aktyvuojamos medžiagos sudėties, aktyvatoriaus koncentracijos ir medžiagų kiekio. Šarmu aktyvuoto betono gamybos proceso metu į atmosferą išskiriamas CO₂ sudaro 20 %, įprasto portlandcementinio betono išskiriamo CO₂ kiekio [2]. Šis rodiklis medžiagų gamybai ir eksploatavimui turi didelę reikšmę, todėl šarmu aktyvuotos medžiagos yra aktualios ir gali būti pritaikomos kaip alternatyvios pakeičiant įprastą portlandcementį.

Šarminio aktyvavimo procesuose dažniausiai naudojami F klasės lakieji pelenai, dėl savo aktyvumo, aukšto aliumosilikatų ir mažų kalcio kiekių cheminėje sudėtyje. Tokie pelenai išgaunami deginant akmens anglį, biomasę ir kitas pramonės atliekas. Rečiau taikomi pelenai, kurie nėra priskiriami aukštos klasės pelenams ir yra mažiau aktyvūs. Tokie pelenai išgaunami buitinių atliekų deginimo gamyklose, kurios yra paplitusios Lietuvoje. Buitinių atliekų pakuros pelenai gali būti priskiriami prie vietinės reikšmės atliekų, dėl didelių kiekių susidarymo ir galimo antrinio panaudojimo perspektyvų. Lietuvoje eksploatuojamos trys didžiausios buitinių atliekų deginimo gamyklos: Vilniaus kogeneracinė jėgainė, Kauno kogeneracinė jėgainė ir Klaipėdos termofikacinė elektrinė, kuriose per metus suformuojama apytiksliai 150 000 tonų buitinių atliekų pakuros pelenų. Susidarę pelenų kiekiai sandėliuojami uždaroje talpose ir transportuojami utilizuoti į kitas valstybes, taip prarandant galimybę pelenus pritaikyti antriniam panaudojimui Lietuvoje. Šarmu aktyvuotų pelenų

cementinė medžiaga gali pasižymėti ne tik maža CO₂ emisija, bet ir atsparumu aukštai temperatūrai, žemu šilumos laidumu ir konkuruoti su portlandcementinėmis medžiagomis konkrečiose nišose. Didelę įtaką produkto savybių susidarymui turi pelenų cheminė ir granulimetrinė sudėtis, jų aktyvumas, šarminio aktyvatoriaus tipas ir koncentracija [3].

Šiuo metu Lietuvoje Kėdainių raj., AB „Lifosa“ gamyklos pašonėje stūkso iš 21 mln. tonų fosfogipso sudaryti kalnai. Fosforo rūgšties gamybos metu susidariusi medžiaga sandėliuojama ir nėra pritaikoma antriniam panaudojimui. Kiekvienais metais susidaro papildomai 446 000 tonų šios atliekos. Mokslinėje literatūroje aprašoma neigiama fosfogipso įtaka aplinkai ir žmonių sveikatai, todėl analizuojamos antrinio panaudojimo galimybės šarmu aktyvuotose mišiniuose [4]. Priešingai nei fosfogipsas, Lietuvoje dėl neišvystytos metalurgijos pramonės nėra išgaunamas šios rūšies šlakas. Šiuo metu metalurginio šlako savybės, aktyvumas ir panaudojimo galimybės yra plačiai tiriamos ir aprašomos mokslinėje literatūroje. Šarmu aktyvuoto šlako gaminiai gali pasižymėti aukštomis gniuždomojo stiprumo savybėmis ir gebėjimu išlaikyti jas veikiant iki 800 °C temperatūrai. Šlako ir fosfogipso atliekos gali būti maišomos ir naudojamos šarminio aktyvavimo procese, dėl fosfogipso įtakos hidratacijos proceso trukmei ir mechaninėms savybėms [5].

Šiame darbe šarmu aktyvuojamos ir analizuojamos Suomijos metalurgijos pramonėje išgauto šlako ir AB „Lifosa“ gamykloje susidarancio fosfogipso atliekos. Tiriamos jų sudėtys, fizikinės savybės, tarpusavio sąveika hidratacijos metu ir antrinio panaudojimo galimybės. Siekiama sukurti porėtą, atsparią aukštai temperatūrai kompozitinę medžiagą, kurią būtų galima pritaikyti statybų sektoriuje kaip tvarią izoliacinę medžiagą ir galimai taptų alternatyva šiuo metu rinkoje vyraujančioms portlandcementinės kilmės medžiagoms.

Magistro baigiamojo darbo tikslas yra ištirti porėtą, šarmu aktyvuotą kompozitinę medžiagą, panaudojant aliumosilikatinius pramonės šalutinius produktus.

Baigiamojo darbo uždaviniai:

1. atlikti literatūros analizę, susijusią su šarmu aktyvuotomis porėtomis kompozitinėmis medžiagomis;
2. nustatyti šlako ir fosfogipso žaliavų pagrindines savybes;
3. suformuoti porėtus šarmu aktyvuoto šlako bandinius;
4. ištirti fosfogipso įtaką porėto šarmu aktyvuoto šlako medžiagos pagrindinėms savybėms;
5. atlikti tyrimų rezultatų apibendrinimą ir suformuluoti išvadas.

1. Literatūros apžvalga

Skyriuje pateikiama mokslinės literatūros šaltinių analizė, susijusi su šarmu aktyvuotų medžiagų tyrimų aktualumu, šarminio aktyvavimo principu, medžiagų elgsena aukštoje temperatūroje, kietėjimo procesais, medžiagos poringumo savybėmis ir pritaikomumo galimybėmis.

1.1. Temos aktualumas

Kyoto protokolas įpareigoja išsivysčiusias šalis kovoti su visuotiniu atšilimu ir mažinti pramonės šalutinių produktų (CO_2) išskirimą. Cemento gamybos pramonė į aplinką išskiria apie 8 % visame pasaulyje išskiriamo CO_2 . Vienas iš sprendimų, tai įprastą portlandcementį pakeisti į aplinkai draugišką rišamąją medžiagą. Alternatyva tai šarmu aktyvuotos medžiagos, kurios vis dažniau tampa mokslinių tyrinėjimų objektu. Yra siūlomos „žalios“ ir aplinkai saugios statybinės rišamosios medžiagos, kurios techninėmis savybėmis prilygsta portlandcementinėms, išskiria mažai šalutinių produktų ir potencialiai pasižymi geresnėmis savybėmis konkrečiose nišose [3].

Šarminis aktyvavimas yra cheminis procesas, kurio metu miltelių pavidalo aliumosilikatas, pavyzdžiui, lakieji pelenai, yra sumaišomi su šarminiu aktyvatoriumi, kad pavirstų į tešlą, kuri gali sukietėti per trumpą laiką. Gautų medžiagų stiprumas, susitraukimas, atsparumas rūgštims ir ugniai priklauso nuo procese naudojamo aliumosilikato sudėties. Priklausomai nuo naudojamų pradinių medžiagų ir kietinimo sąlygų, šarmu aktyvuoti rišikliai gali pasižymėti dideliu gniuždomuoju stiprumu, mažomis susitraukimo deformacijomis, atsparumu ugniai ir mažu šilumos laidumu [6].

Lakiųjų pelenų aktyvavimas šarmu gali būti laikoma viena iš perspektyviausių tradicinių hidraulinių rišiklių alternatyvų, ypač jei hidratacija vyksta kambario temperatūroje. Siekiant rasti tinkamiausią cheminę sudėtį, kuri reaguotų kambario temperatūroje, buvo ištirti du lakiųjų pelenų tipai, su skirtingais $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ moliniais santykiais svyruojančiais nuo 0,12 iki 0,20. Nustatyta, jog gautos medžiagos savybėms daugiausia įtakos turi lakiųjų pelenų rūšis, ypač jų smulkumas ir mineralinė sudėtis. Šarmu aktyvuotų pelenų medžiagos sąlyginai lengvos ir pasižyminčios geromis terminėmis savybėmis, t. y., gebėjimu atlaikyti aukštas temperatūras neprarandant savo savybių [3].

Aktuali tyrinėjimų tema yra biomasės lakiųjų pelenų kaip šarmu aktyvuoto rišiklio panaudojimo galimybė. Šarmu aktyvuoti kompleksiniai rišikliai yra besivystanti tyrimų kryptis, kuri analizuoja kietųjų atliekų, tokių kaip lakiųjų pelenų panaudojimą ir tai galėtų būti aplinkosauginė alternatyva įprastam portlandcemenčiui. Mišiniui sudaryti buvo naudojami biomasės lakieji pelenai ir metakaolino komponentai. Šarminio aktyvatoriaus paruošimui naudoti skirtingi NaOH ir natrio silikatų medžiagų kiekiai, santykiu 2:1, 1:0,5 ir 1:1. Po 10 dienų medžiagos kietėjimo buvo nustatyta, jog biomasės lakiųjų pelenų kompozitinės medžiagos gniuždomasis stiprumas tiesiogiai proporcingas NaOH kiekiui medžiagoje. Didžiausią gniuždomąjį stiprumą – 38 MPa pasiekė kompozitinė medžiaga, kurios sudėtyje vyravo 40 % metakoalino ir 60 % biomasės lakiųjų pelenų. Biomasės lakiųjų pelenų ir metakaolino mišinys tinkamas šarmu aktyvavimo procese, kadangi cementinė medžiaga pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis [7].

Šarmu aktyvuotų pelenų medžiaga gali pasižymėti ne tik geromis mechaninėmis savybėmis, bet ir gebėjimu atlaikyti aukštą temperatūrą. Naudojant skirtingų cheminių sudėčių šarminius aktyvatorius, aktyvuotų pelenų medžiaga veikiama tiesiogine ugnimi išliko nepakitusi, o kai kuriais atvejais net pagerino savo mechanines savybes. Šarmu aktyvuotų pelenų medžiagos gali būti panaudojamos ir padengiant kitų medžiagų paviršius, suteikiant joms terminį stabilumą. A. Fernandez-Jimenez ir A.

Palomo bandyme šarmu aktyvuotų pelenų suspensija padengta ant stiklo ir anglies pluošto medžiagų, neleido palaikyti degimo ir plisti liepsnai, o medžiagų atsparumas ugniai priklausė nuo padengto sluoksnio storio ir adhezijos [6].

1 lentelė. Portlandcemenčio ir šarmu aktyvuotų medžiagų palyginimas

Tipas	Portlandcementinė medžiaga	Šarmu aktyvuota medžiaga (ŠAM)
Teigiamos savybės	Aukštos gniuždomojo stiprumo savybės	Ekologiška medžiaga, mažai išskirianti CO ₂
	Atsparumas šalčiui	Ekonomiška medžiaga
	Lengvas medžiagos išgavimas	Atspari aukštai temperatūrai
	Reaguoja kambario temperatūroje	Atspari cheminei korozijai
	Nelaidumas vandeniui	Mažas skysčių ir chlorido jonų laidumas
	Patvarumas	Matmenų stabilumas eksploatacijos metu
	Plačios pritaikymo galimybės	Gamybos procesas sunaudoja mažai energijos
Neigiamos savybės	Išskiriamas didelis kiekis CO ₂	Kietėja aukštesnėje nei kambario temperatūroje
	Nėra atsparus aukštai temperatūrai	Sudėtingas gamybos procesas
	Sudėtingas gamybos procesas	Didelės susitraukimo deformacijos džiovimo proceso metu
	Gamybos procesas sunaudoja didelį kiekį energijos	Šarminės aplinkos pavojus

Šarmu aktyvuojama ir daugiau rišamųjų medžiagų, kurios savo savybėmis ne tik prilygsta portlandcemenčiui, bet ir yra pranašesnės. Viena iš jų, tai metalurgijos pramonės šalutinis produktas ir aliumosilikato pirmtakas – šlakas. M. Najimi'is, N. Ghafoori'is ir kt. išanalizavo ir palygino šarmu aktyvuoto šlako cementinės medžiagos ir įprasto portlandcemenčio kietėjimo laiką, hidratacijos metu išskiriamą šilumos kiekį, stiprumą ir susitraukimo deformacijas. Eksperimente buvo naudojami NaOH ir Na₂SiO₃ šarminiai aktyvatoriai, smulkūs užpildai ir distiliuotas vanduo. Išanalizavę įvairias šių medžiagų kiekių kombinacijas bandiniuose, tyrėjai nustatė, jog didesnis šlako ir šarmų kiekis tiesiogiai daro įtaką cementinės medžiagos stiprumo didėjimui ankstyvose (1–3 dienos) ir vėlesnėse (28–30 dienų) kietėjimo stadijose. Nustatytas kietėjimo laikas artimas portlandcementinės medžiagos kietėjimo laikui, o didesnės susitraukimo deformacijos pastebėtos šarmu aktyvuotame bandinyje. Vienas iš ryškiausiai pastebimų skirtumų tarp lyginamų rišamųjų medžiagų, tai hidratacijos metu išskiriamos šilumos kiekis, kurios šarmu aktyvuota medžiaga išskyrė ženkliai mažesnę kiekį. Būtent šis privalumas gali puikiai pasitarnauti masinėje betono gamyboje siekiant sumažinti išskiriamos šilumos kiekį į aplinką ir prisidėti prie klimato kaitos mažinimo [8].

Mokslininkai A. A. M. Neto, M. A. Cincotto ir W. Repette ištyrė šarmu aktyvuoto šlako susitraukimo deformacijų priežastis ir nustatė, jog susitraukimas susideda iš dviejų etapų: 1-as etapas, tai ryškus vandens praradimas, kai bandinys išimamas iš formos ir atvirai paveikiamas atmosferinės aplinkos, o 2-as etapas susijęs su vandens praradimu dėl išgaravimo hidratacijos metu. Nustatyta, jog vandens praradimas 2-ojo etapo metu nėra didelio susitraukimo priežastis. Šarminio aktyvatoriaus SiO₂ kiekis turi didžiausią įtaką didelio vandens kiekio praradimui, kuris siejamas su 1-uoju etapu. Aktyvatoriaus kiekis lemia medžiagos hidratacijos proceso intensyvumą, susidarančio gelio kiekį ir poringumo sumažėjimą, tai verčia bandinį trauktis, greitai keisti savo išorinius matmenis ir atsiverti plyšiams [9].

Šarmu aktyvuotos cementinės medžiagos neigiamų savybių atsiradimui įtakos turi ne tik didesnis šarminių aktyvatorių kiekis, bet ir kietėjimo temperatūra. Ya-min Gu, F. Yong-hao ir kt. nustatė šarmu aktyvuoto šlako cementinės tešlos kietėjimo trukmės ir mikrostruktūros susidarymo priklausomybę nuo kietėjimo temperatūros. Kietėjimo temperatūrai esant žemesnei nei 7–15 °C, šarmu aktyvuotos medžiagos stingimo trukmė sumažėja ir praranda stiprumines savybes ankstyvoje formavimosi fazėje. Aukštesnėje temperatūroje (~30 °C) susiformuoja tankesnė ir mažiau porėta medžiagos mikrostruktūra. Tačiau medžiagai kietėjant žemesnėje temperatūroje sulėtinamas džiūvimo greitis, taip išvengiama staigaus bandinio deformavimosi ir plyšių atsiradimo [10].

Siekiant sumažinti šarmu aktyvuotų medžiagų neigiamas savybes, galima naudoti ne vieną aktyvų aliumosilikatinį pirtaką, o kelis. Tyrėjų X. Gao, Q. L. Yu ir kt. išanalizuota šarmu aktyvuotų lakiųjų pelenų ir šlako sąveika bei kompozitinės medžiagos savybės. Nustatyta, jog didesnis šlako santykis cementinėje tešloje nulemia tankesnę struktūrą, aukštesnį gniuždomąjį stiprumą, tačiau greitesnį kietėjimo laiką ir didesnes susitraukimo deformacijas. Didesnis lakiųjų pelenų santykis nulemia didesnę medžiagos slankumą, lėtesnę kietėjimo trukmę ir lėtesnę hidratacijos procesą bei mažesnes susitraukimo deformacijas. Šlako ir lakiųjų pelenų sąveika gerina bendrąsias medžiagos savybes ir užtikrina stabilų gelio susidarymą. Svarbu iš anksto nusistatyti kokios medžiagos savybės aktualios ir tinkamai parinkti šlako ir pelenų santykį, siekiant išgauti geriausias kompozitinės medžiagos savybes [11].

Pramonės šalutinių medžiagų ir atliekų aktyvinimas šarmu yra daug žadanti technologija. Šios medžiagos yra vienos iš sparčiausiai įsitvirtinančių alternatyvų, galinčios pakeisti įprastą portlandcementį dėl savo teigiamų savybių. Tačiau būtina atsižvelgti į nagrinėjamų medžiagų neigiamą įtaką galutiniam produktui. Teigiamų ir neigiamų savybių palyginimas pateiktas 1 lentelėje. Tolesnis šių medžiagų tyrinėjimas, tobulinimas ir pritaikymas turi įtakos masinei komercializacijai.

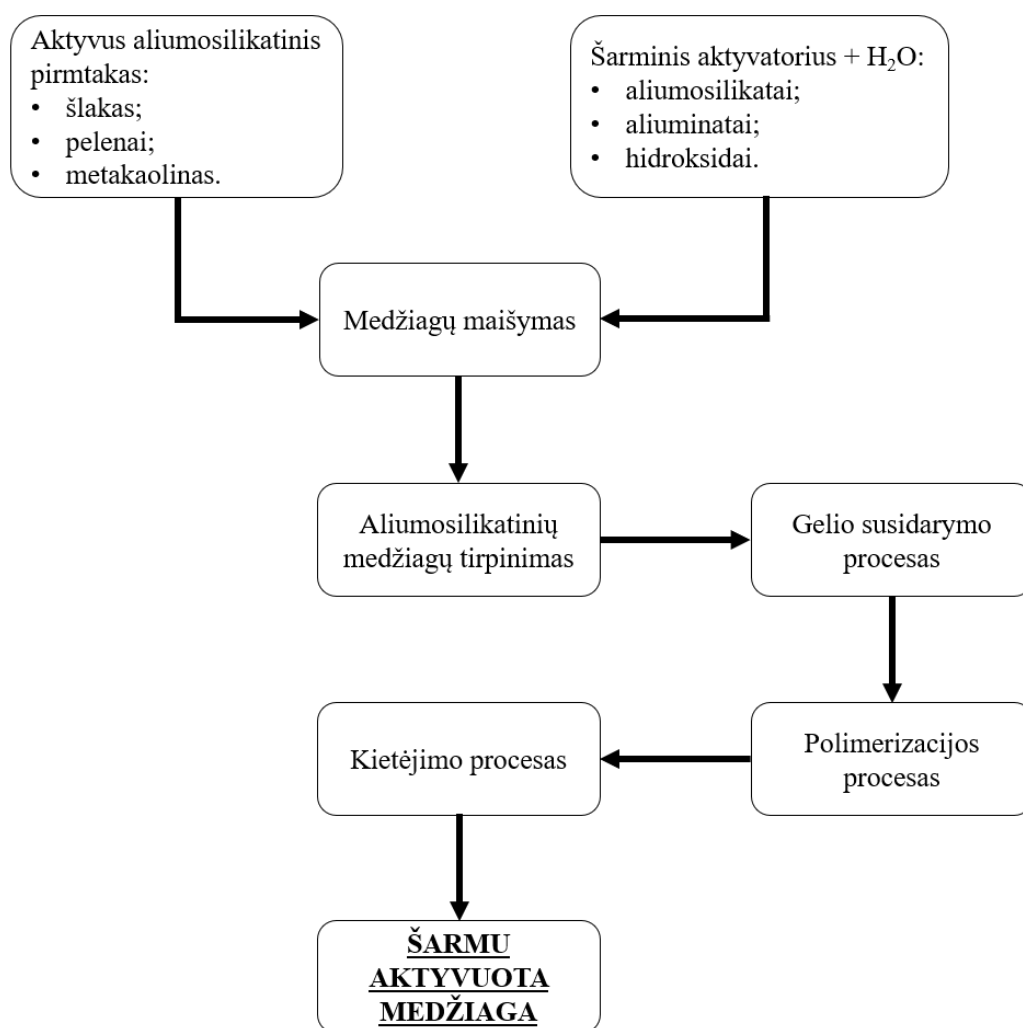
1.2. Šarminio aktyvavimo principas ir pagrindinės medžiagų savybės

V. Glukhovsky pirmasis autorius, kuris ištyrė rišamąsias medžiagas, naudotas senovės Romos ir Egipto statyboje ir išrado naują rišamųjų medžiagų tipą – „gruntas-cementas“. Ši rišamoji medžiaga sudaryta sumaišius maltą aliumosilikatą ir šarmais prisotintas pramonines atliekas. V. Glukhovsky taip pat suklasifikavo šarminius aktyvatorius į šešias grupes, kur M yra šarminis katijonas:

- šarmai, MOH ;
- silpnos rūgšties druskos, M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF ;
- silikatai, $M_2O \cdot nSiO_3$;
- aluminatai, $M_2O \cdot nAl_2O_3$;
- aliumosilikatai, $M_2O \cdot nAl_2O_3 \cdot (2-6)SiO_2$;
- stiprios rūgšties druskos, M_2SO_4 .

V. Glukhovsky teorija detalai apibūdina šarminio aktyvavimo procesą. Reakciją sudaro keturi pagrindiniai procesai: aliumosilikatinių medžiagų tirpinimas, gelio susidarymas, polimerizacija ir sukietėjimas. Apskritai pradiniame etape, kai šarmo tirpalas kontaktuoja su aliumosilikatinių medžiagų dalelėmis, jis ištirpsta suformuodamas stiklo fazę, susidaro monomerai ir galiausiai aliuminatų ir silikatų polimerai. Jie kontaktuoja vienas su kitu, sudarydami vientisą struktūrą, sukurdami trimatį aliumosilikato gelį, dar vadinamą ceolito pirtaku. Šis gelis yra atsakingas už šarmais aktyvuotos medžiagos savybių kokybę [12].

Gelis yra pagrindinis šarminio aktyvavimo reakcijos produktas sudarytas iš koordinuotų tetraedro formos silikatų grandinių, kurios kiekvieną grandinę sudaro $(3n-1)$ tetraedrai. Priklausomai nuo šarminio aktyvatoriaus prigimties, skirtingai formuojasi gelio tetraedro grandinės, o tai tiesiogiai daro įtaką gelio savybėms ir cementinės medžiagos charakteristikoms [13].



1 pav. Šarminio aktyvavimo procesas

Populiariausios aliumosilikatinės medžiagos, kurios panaudojamos šarminiui aktyvavimui – akmens anglies lakieji pelenai, šlakas ir metakaolinas. Kiekviena iš šių medžiagų yra plačiai iširta ir naudojama šarmu aktyvuotų cementinių medžiagų gamyboje.

1.2.1. Akmens anglies pelenai

Vienas iš primityviausių būdų išgauti šilumą yra organinės medžiagos degimas sąveikaujant su deguonimi iki kol visa medžiaga pavirsta pelenais. Akmens anglis – organinė medžiaga, kurios deginimas elektrinėse yra plačiausiai taikomas šilumos gamybos būdas pasaulyje. Pelenai – šalutinis šiluminių elektrinių produktas, kuris apibūdinamas kaip aplinką teršiantis. Akmens anglies pelenai dažniausiai naudojami kaip šarmu aktyvuotos cementinės tešlos pamatinė medžiaga dėl paprasto išgavimo proceso ir mažos kainos. Pelenai skirstomi į grupes pagal cheminę sandarą ir elementų kiekį medžiagoje. Plačiausiai pritaikomi F klasės lakieji pelenai dėl didesnio nei 70 % SiO_2 , Al_2O_3 ir Fe_2O_3 kiekio ir šių medžiagų sąveikos aktyvumo. Aktyvumo laipsnį nulemia pelenų mikrostruktūra ir

cheminė sudėtis, t. y. dalelių dydis ir jų pasiskirstymas, sudėtis ir aktyvatoriaus koncentracija [14, 15].

Aluminio kiekis pelenuose ir jo išsiskyrimas aktyvuojant šarmu, gali nulemti pagrindines medžiagų savybes: stiprumą, kietėjimo trukmę, mikrostruktūrą ir atsparumą korozijai. Nustatyta, jog šarmu aktyvuojant lakiuosius pelenus galima pagerinti šias cementinės medžiagos charakteristikas:

- mažas vandens sunaudojimas ir išsiskyrimas iš cementinės tešlos dėl dalelių sferinės formos;
- mechaninių savybių patobulinimas dėl mažesnio vandens poreikio;
- mažesnė kaina dėl pelenų lengvo išgavimo;
- mažesnis CO₂ išskyrimas į aplinką;
- patvarumas ir mažas laidumas vandeniui;
- atsparumas aukštai temperatūrai;
- atsparumas cheminei korozijai [15].

1.2.2. Šlakas

Geležies išgavimas pramonėje susijęs su geležies rūdos lydymu aukštakrosnėse. Geležies gryninimo proceso šalutinis produktas – šlakas, kuris susiformuoja ant geležies paviršiaus. Skystos agregatinės būsenos šlakas yra atskiriamas ir vėsinamas, taip formuojama jo struktūra. Priklausomai nuo vėsinimo pobūdžio šlakas yra skirstomas į: stambios frakcijos, porėtą ir granuliuotą. Granuliuotas šlakas yra naudojamas cementinių medžiagų gamyboje, dėl smulkios frakcijos ir palankios cheminės sudėties. Teoriškai cheminę sudėtį sudaro: SiO₂, CaO, Al₂O₃ ir MgO elementai, kurių kiekis kinta priklausomai nuo lydamos medžiagos grynumo, plieno ar aukštakrosnės tipo. Nustatyta, jog šlako aktyvumui įtakos turi susiformavusios stiklo fazės kiekis, kuris susiformuoja dėl lydymosi ir staigaus atvėsimo bei priklauso nuo SiO₂ ir Al₂O₃ kiekio medžiagoje [16].

Šarminio aktyvatoriaus tipas, pH ir SiO₂ kiekis tiesiogiai daro įtaką cementinės medžiagos mechaninėms savybėms, poringumui ir hidratacijos procesui. Šarmu aktyvuojant šlaką, cementinė medžiaga gali pasižymėti šiomis savybėmis:

- mažu vandens laidumu dėl rafinuoto porų tinklo pasiskirstymo;
- atsparumu korozijai (chloridams);
- aukštomis mechaninėmis charakteristikomis, gniuždomuoju stiprumo ankstyvo kietėjimo būsenoje (1–3 dienos);
- mažu poringumu;
- mažomis susitraukimo deformacijomis ir pleišėjimu;
- mažu CO₂ išskyrimu į aplinką;
- atsparumu šalčiui (300–1300 šalčio ciklų) naudojant Na₂SiO₃ aktyvatorių [17, 18].

1.2.3. Metakaolinas

Prancūzų mokslininkas J. Davidovits pirmasis paskelbė mokslinius straipsnius bei užpatentavo šarminį aktyvavimą metakaolino rišamąja medžiaga. Mokslininkas supažindino visuomenę su geopolimerizacija ir šarminiu aktyvavimu naudojant metakaoliną, o tai davė puikią pradžią naujų rišamųjų medžiagų tyrinėjimui [19]. Metakaolinas – tai pucolaninė medžiaga, formuojama kaitinant molio mineralą – kaolinitą, 500–800 °C temperatūroje, kurio aktyvumas priklauso nuo mineralo dalelių dydžio, grynumo ir kristališkumo. Kaolinitas yra viena plačiausiai pritaikomų pramoninių

medžiagų, dėl savo baltos spalvos, švelnumo, smulkaus dalelių dydžio ir cheminio inertiškumo. Cheminę sudėtį teoriškai sudaro: SiO_2 , Al_2O_3 ir H_2O elementai, kurių kiekis kinta priklausomai nuo geografinės išgavimo vietos [20].

Cementinės medžiagos savybės šarmu aktyvuojant metakaoliną priklauso nuo silicio dioksido (SiO_2) ir aliuminio oksido (Al_2O_3) santykio. Taip pat aktualios kietėjimo sąlygos ir naudojamo aktyvatoriaus tipas. Parinkus reikiamo aktyvumo metakaoliną ir aktyvatoriaus tipą, galima išgauti šias cementinės medžiagos savybes:

- aukštas mechanines savybes, gniuždomąjį stiprumą;
- atsparumą rūgštims, jūros vandeniui ir natrio sulfatui;
- atsparumą aukštai temperatūrai ir terminį stabilumą (1200–1400 °C);
- mažas cementinės medžiagos susitraukimo deformacijas;
- mažą CO_2 išskyrimas į aplinką;
- patvarumą dėl porų tinklo išsidėstymo [19, 20].

Stipriais šarmais aktyvuojami pelenai, šlakai ir metakaolinas yra plačiausiai ištirtos ir taikomos medžiagos, šarmu aktyvuotos cementinės tešlos ir betono gamyboje. Šiomis dienomis mokslininkai ir toliau tyrinėja šių medžiagų savybių priklausomybę nuo cheminės ir mineralinės sudėties, kietėjimo sąlygų ir aktyvatoriaus tipo. Kiekviena medžiaga turi savo teigiamų ir neigiamų savybių, kurias bandoma analizuoti ir spręsti. Tiriama ir daugiau pramonės atliekų tipų, siekiant jas panaudoti naujam gyvavimo laikotarpiui kaip pirmtakus šarminiam aktyvavimui. Žvelgiant iš ilgalaikės perspektyvos, naujų medžiagų tyrinėjimas ir analizė gali pakeisti šiomis dienomis plačiai taikomas medžiagas, dėl savo pranašumų ir ekonomiško. Tai yra:

- akmens anglies mineralinė atlieka – gamtinis aliumosilikatas, kurio mineralinį pagrindą sudaro: kaolinas, kvarcas ir lauko špatas;
- raudonasis purvas – išgaunamas gryninant aliuminio rūdą (boksitą) ir yra priskiriamas gryninimo atliekai. Ši atlieka prisotinta SiO_2 , Al_2O_3 ir Fe_2O_3 sudaryta iš kvarco, molio ir hematito mineralų;
- ryžių lukštų pelenai – tai atlieka gaunama deginant ryžių lukštus šiluminėse elektrinėse. Medžiagos cheminį pagrindą sudaro amorfinis ir dalinai kristalinis SiO_2 , todėl yra aktyvus ir gali būti naudojamas kaip pucolanas;
- palmių aliejaus pelenai – tai yra palmių aliejaus industrijos šalutinis produktas, kuris dėl savo pucolaninių savybių gali būti pritaikomas cementų ir betonų gamyboje;
- stiklo atliekos – gali būti taikomos kaip papildomas silicio šaltinis silikatiniuose tirpaluose;
- keramikos atliekos – tai atlieka, kuri gaunama po mūrinių statinių griovimo ar porceliano gamybos pramonėje. Šiose atliekose vyraujantys cheminiai elementai: SiO_2 ir Al_2O_3 , kai silicio dioksidas yra kristalinėje būsenoje [21].

1.3. Šarmu aktyvuotų medžiagų elgsena aukštose temperatūrose

Sukurti statybinę medžiagą, kuri gebėtų išlikti nepažeista veikiant aukštai temperatūrai yra viena iš mokslinių tyrimų siekiamybių. Terminis medžiagų stabilumas yra svarbus siekiant užtikrinti jų patikimumą ir pritaikomumą.

Cementinės medžiagos, kurioms naudojamas portlandcementis kaip rišamoji medžiaga, nepasižymi geromis terminėmis savybėmis. Medžiagos stiprumas ir pastovumas pradeda mažėti paveikus ją 200 °C temperatūra, dėl vandens praradimo ir pagrindinių rišimosi fazių susiskaidymo.

Šarmu aktyvuotos medžiagos buvo pradėtos tyrinėti dėl mažo energijos poreikio gamybos proceso metu ir mažo šalutinių produktų išskyrimo į aplinką. Pastebėta, kad šarmu aktyvuotos medžiagos pasižymi aukštomis mechaninėmis savybėmis, mažu susitraukimu kietėjant, greitu kietėjimo procesu ir atsparumu cheminei korozijai bei aukštai temperatūrai [22].

Siekiant ištirti šarmu aktyvuotų medžiagų elgseną aukštose temperatūrose, tyrėjai A. Fernandez-Jimenez ir A. Palomo atliko šiuos bandymus: gniuždomojo ir lenkiamojo stiprumų charakteristikų nustatymą, vyraujant nuo 25 °C iki 600 °C temperatūroms, taip pat gniuždomojo stiprumo nustatymą po aukštų temperatūrų (200, 400, 600, 800 ir 1000 °C) poveikio praėjus 1h laikotarpiui. Nustatyta, jog šarmu aktyvuotų pelenų medžiagos mechaninių savybių rezultatai abejais atvejais geresni nei standartinės portlandcementinės medžiagos. Šarmu aktyvuotų pelenų medžiagos charakteristikos nepakito, o kai kuriais atvejais net pagerėjo veikiant nuo 25 °C iki 600 °C temperatūrai. Remiantis termografinė analize, temperatūros sukeltas svorio sumažėjimas šarmais aktyvuotuose pelenuose buvo žymiai mažesnis nei portlandcemenčio bandiniuose. Šis skirtumas išryškėjo veikiant 450 °C ir didesnei temperatūrai. Šarmu aktyvuotų pelenų medžiaga tokioje temperatūroje išlieka struktūriškai stabili ir nesupleišėjusi [23].

Mokslininkai L. Carabba ir kt. ištyrė perdirbtų keramikos atliekų įtaką šarminio aktyvavimo procesui ir terminių savybių rezultatui. Terminis stabilumas buvo nustatomas naudojant krosnelę, kurioje bandiniai kaitinti nuo 800 °C iki 1000 °C. Bandymo rezultatai parodė, jog perdirbtos keramikos dalys nepakenkė šarminio aktyvavimo procesui. Jos padidino atsparumą plyšių atsiradimui veikiant ugniai ir pagerino medžiagos struktūrinį stabilumą veikiant 1240 °C temperatūrai. Gauti rezultatai parodė, jog perdirbtos keramikos atliekos gali būti pritaikomos šarmu aktyvuojamų medžiagų sudėtyse, kadangi yra inovatyvios, tvrios ir pasižymi struktūriniu bei terminiu stabilumu veikiant aukštai temperatūrai [24].

J. Henon'as, A. Alzina'as ir kt. ištyrė porėtų šarmų aktyvuotų medžiagų šiluminį laidumą. Nustatyta, jog šiluminis laidumas tiesiogiai priklausė nuo porų tūrio bandinyje, t. y. porų tūris sudarantis 65–85 % bandinio tūrio, pasižymėjo šiluminiu laidumu nuo 0,12 iki 0,33 W/m·K. Šarmu aktyvuotų lakiųjų pelenų cheminė sudėtis papildyta mikrosilika, kuri šarminėje aplinkoje oksiduojasi, o išskiriamas vandenilis suformuoja medžiagos poringumą. Poringumas taip pat gali būti kontroliuojamas apdorojant medžiagą sąlyginai neaukštoje temperatūroje 25–75 °C. Šarmu aktyvuotų lakiųjų pelenų medžiaga pasižymėjo atsparumu aukštai temperatūrai, mažais gamybos kaštais ir galimybe panaudoti pramonines atliekas [25].

J. Temuujin'as ir kt. ištyrė šarmu aktyvuotų medžiagų pritaikymą veikiant aukštai temperatūrai, t. y. kaip šiluminius barjerus, ugniai atsparius elementus. Tyrimui naudojo 5-ių skirtingų rūšių lakiuosius pelenus, skirtingų koncentracijų natrio silikatus ir natrio aluminatus. Šarmu aktyvuoti bandiniai,

veikiami 1000 °C pasižymėjo skirtingomis savybėmis, kurios priklausė nuo Si:Al santykio bandiniuose. Šarmu aktyvuoti lakieji pelenai, kuriuose Si:Al santykis (>5), bandiniai pasižymėjo mažu gniuždomoju stiprumu, tačiau po aukštos temperatūros poveikio, bandiniai išliko struktūriškai ir termiškai stabilūs taip pat turėjo didesnę gniuždomąją stiprumą. Šarmu aktyvuoti lakieji pelenai, kuriuose Si:Al santykis <2, pasižymėjo aukštu gniuždomoju stiprumu, tačiau po aukštos temperatūros poveikio, bandiniai neturėjo gero struktūrinio ir terminio stabilumo, o gniuždomasis stiprumas sumažėjo. Nustatyta, jog Si:Al santykis turėjo įtakos šarmu aktyvuotų medžiagų mechaninėms ir terminėms savybėms. Taip pat buvo pastebėti bandinių mikrostruktūros pokyčiai po aukštos temperatūros poveikio, kai dėl sukepimo pagerėjo dalelių tarpusavio sankabumas [26].

Porėtos struktūros medžiagos gali būti pritaikomos kaip terminiai barjerai, dėl atsparumo aukštos temperatūros poveikiui [27]. P. Hlavaček ir kt. ištyrė šarmu aktyvuotų pelenų porėtojo betono savybes. Lakiųjų pelenų, šarminio aktyvatoriaus ir aliuminio pudros mišinys tyrėjams leido sukurti porėtą šarmu aktyvuotą cementinę medžiagą. Medžiagos tankis vyravo tarp 400–800 kg/m³ ir pasižymėjo panašiomis mechaninėmis savybėmis kaip visuomenei plačiai prieinamas porėtas betonas. Šarmu aktyvuotas bandinys pasižymėjo atsparumu aukštai temperatūrai, t. y. veikiant iki 800 °C temperatūrai, iš bandinio pasišalino chemiškai ir fiziškai surištas vanduo, o bandinys išliko struktūriškai stabilus. Tik pasiekus 1100 °C pastebėtas bandinio susitraukimas ir struktūros sukepimas. Šarmu aktyvuotų lakiųjų pelenų porėti bandiniai buvo iširti veikiant agresyviai ilgalaikiai cheminei korozijai. Bandiniai buvo panardinti į stiprių rūgščių (Na₂SO₄, MgSO₄, NaCl, H₂SO₄, ir HCl) tirpalus iki 360 dienų. Bandiniai išliko nepakitę ir neviršijo leidžiamo prisotinimo laipsnio, tai įrodė jog poros – uždaro tipo. Apibendrinus gautus rezultatus, nustatyta jog porėta šarmu aktyvuotų lakiųjų pelenų medžiaga pasižymėjo ypatingu atsparumu aukštai temperatūrai (iki 1100 °C), atsparumu agresyviai cheminei korozijai, sudarydama uždarų porų tinklą [28].

H. Cheng-Yong'as ir kt. ištyrė ir palygino šarmu aktyvuotų lakiųjų pelenų paprastojo ir porėto betono charakteristikas veikiant bandinius aukšta temperatūra. Tyrimo metu nebuvo pastebėtas bandinių pleišėjimas ar skilimas dėl temperatūros. Bandinius paveikus 400 °C, pastebėtas gniuždomojo stiprumo sumažėjimas, tačiau porėtąjį betoną paveikus 800 °C, stiprumas išaugo dėl mikrostruktūros sukepimo. Veikiant aukštesnei nei 800 °C temperatūrai, buvo pažeistas šarmu aktyvuotos medžiagos vidus, išgaravus vandeniui matomas mikrostruktūros sukepimas ir lydymasis. Nustatyta, jog bandinyje susidariusios poros sumažino aukštos temperatūros įtaką, kadangi porose esanti tuštuma padėjo neutralizuoti karščio daromą žalą [22].

Šarmu aktyvuotų medžiagų savybės buvo iširtos į medžiagos sudėtį įmaišius 0–10 % fosfogipso. Tyrėjai D. Vaičiukynienė, D. Nizevičienė ir kt. nustatė, jog sudėtyje vyraujant fosfogipsui, nustatytas didesnis šarmu aktyvuotų bandinių gniuždomasis stiprumas, paveikus juos 800 °C temperatūra. Sudėtyje vyraujant 5 % fosfogipso pastebėtas didžiausias – 1,2 karto didesnis gniuždomasis stiprumas po temperatūros poveikio. Gauti rezultatai parodė, jog pramonės šalutinio produkto – fosfogipso, įmaišymas į šarmu aktyvuoto šlako sudėtį gali turėti teigiamų padarinių, kai siekiama pagerinti medžiagų terminį atsparumą. Tokia medžiaga gali būti naudojama padengiant medinių, plieninių ar gelžbetoninių konstrukcijų paviršius ir apsaugoti juos nuo aukštos temperatūros poveikio [5].

D. Bajare, L. Vitola ir kt. ištyrė porėtų šarmu aktyvuotų perdirbtų medžiagų pritaikymo galimybes, veikiant aukštai temperatūrai. Tyrėjai naudojo perdirbtas medžiagas, kurios gaunamos iš gamybos ir chemijos pramonės atliekų: aliuminio drožlių ir keramikos pirtako – šamoto. Šarmu aktyvuotos porėtos cementinės medžiagos pokyčius veikiant iki 1200 °C temperatūrai, tyrėjai suskirstė į keturias

atskiras fazes. Pirmoji fazė – fiziškai absorbuoto vandens išgaravimas. Pasireiškia egzoterminis procesas temperatūrai kylant 100–150 °C. Antroji fazė – chemiškai surišto vandens išgaravimas, veikiant 150–600 °C temperatūrai. Jis gaunamas ištirpinus gryną aliumosilikatą, todėl susiformuoja aliumininis ir silicis. Trečioji fazė – iki 5 % masės praradimas veikiant 600–900 °C, taip pat pastebėtas medžiagos tankėjimas. Ketvirtoji fazė – staigus medžiagos tankėjimas, susitraukimas ir masės praradimas nustatytas veikiant aukštesnei nei 1000 °C temperatūrai [29].

Ištirta šarmu aktyvuota šamoto ir aliuminio drožlių cementinė medžiaga pasižymėjo dideliu poringumu (71–75 %) ir efektyvia darbine temperatūra nuo 800 °C iki 1000 °C. Porėtos medžiagos bandiniai išliko nepakitę po 8-ių termošoko ciklų. Termošoko ciklas – bandinys 60 min. kaitinamas krosnyje 800 °C temperatūroje, po to 20 min. vėsinaamas fenu ir tiriamas ultragarso sklidimo greitis (m/s) bandinyje. Nustatyta, jog šamoto ir aliuminio drožlių įkomponavimas į šarmu aktyvuotos medžiagos sudėtį pagerino medžiagos atsparumą aukštai temperatūrai dėl Al₂O₃ kiekio didėjimo. Ši inovatyvi šarmu aktyvuota medžiaga įrodė, jog gali būti naudojama aplinkoje iki 1000 °C, išlikti termiškai stabili ir nesuirti [29].

1.4. Šarmu aktyvuotų medžiagų kietėjimo procesas

Žvelgiant iš hidratacijos pusės, šarminis pelenų aktyvavimas smarkiai skiriasi nuo portlandcemenčio hidratacijos proceso, tačiau turi ir panašumų, kurie susiję su ceolitų sinteze. Pagrindinis šarmu aktyvuotų pelenų hidratacijos proceso produktas yra šarminis aliumosilikato gelis, kitaip vadinamas konkrečios kristalinių ceolitų rūšies pirmtaku. Didelę įtaką šarmu aktyvuotų pelenų cementinės medžiagos formavimuisi turi kietėjimo sąlygos. Jeigu kietėjimo sąlygos yra nepalankios, galimas karbonizacijos proceso atsiradimas. Karbonizacijos procesas lemia pH koncentracijos kritimą, pelenų aktyvavimo trukmės lėtėjimą ir ryškų mechaninių savybių sumažėjimą. Šio proceso atsiradimo galima išvengti, kontroliuojant medžiagos kietėjimo sąlygas – santykinį drėgnumą. Ankstyvoje medžiagos formavimosi stadijoje, kai medžiaga tiesiogiai kontaktuoja su atmosfera, įvyksta staigi karbonizacija. Tačiau medžiagai toliau kietėjant CO₂ darosi vis sunkiau prasiskverbti pro medžiagos matricą. Karbonizacijos procesas didžiausią intensyvumą pasiekia santykinėi drėgmei svyruojant nuo 45 % iki 75 %. Tokiomis sąlygomis išsiskiriantis CO₂ ganėtinai lengvai skverbiasi kiurai medžiaga. Kai santykinis aplinkos drėgnumas užtikrinamas didesnis nei 80 %, šarmu aktyvuotų pelenų medžiagos poros yra prisotintos vandens ir neleidžia plisti dujoms, todėl formuojasi tanki ir mažai porų turinti medžiaga. Priešingai, jei medžiaga formuojasi ypač sausoje aplinkoje, kai santykinė drėgmė žemesnė nei 25 %, vandens nebuvimas užkerta kelią CO₂ išsiskyrimui. Susiformuoja natrio bikarbonatas, pH koncentracija stipriai krinta ir šarminio aktyvavimo procesą padaro neefektyvų, todėl iš esmės pablogina sąlygas šarminio aliumosilikatinio gelio susiformavimui [30].

Kietėjimo sąlygos turi didelę įtaką šarmu aktyvuotų pelenų mikro ir nano struktūrų susiformavimui. Medžiagos savybės priklauso nuo: kietėjimo trukmės, temperatūros ir santykinės drėgmės. Kietėjant sandariame inde, kuriame užtikrinama didesnė nei 90 % santykinė drėgmė, gaunama tanki ir mažai porėta medžiaga. Didelis aliuminio kiekis leidžia geriau sureaguoti siliciui, kuris daro tiesioginę įtaką tolesniam mechaninių savybių vystymuisi. Šarmu aktyvuotų pelenų medžiagai, kietėjant atviroje aplinkoje, esant 40–50 % santykinėi drėgmei, susiformuoja mažiau tanki ir porėta medžiaga. Mėginių tiesioginis kontaktas su atmosfera ankstyvoje stadijoje lemia jos tankį, poringumą ir mechanines savybes, kadangi vykstant karbonizacijai greičiau prarandamas vanduo [31].

Medžiagos, gautos šarmu aktyvuojant žaliavas, turinčias SiO_2 ir Al_2O_3 dar kitaip vadinamos geopolimerais. Geopolimerai sintetinami panaudojant šarminį tirpalą (aktyvatorių) ir kietus aliumosilikato mineralus (žaliavą). Geopolimerizacija vykdoma kambario ar šiek tiek aukštesnėje temperatūroje, kada žaliava (kietos aliumosilikato dalelės) tirpinama šarminiame tirpale. Reakcijos metu žaliava iš kietosios būsenos pereina į gelinę, kur susiformuoja kieta rišamoji medžiaga. Geopolimerams gauti reikalinga žaliava, turinti daug Al_2O_3 ir SiO_2 , tai yra lakieji pelenai, šlakai, įvairūs moliai. Šarmu aktyvuotų lakiųjų pelenų geopolimerinės medžiagos šilumos laidumas priklauso nuo susidariusių porų morfologijos [32]. J. Feng'as, R. Zhang'as ir kt. atliktais tyrinėjimais buvo nustatyta, jog naudojant lakiuosius pelenus ir skystą stiklą galima pagaminti mažo šiluminio laidumo geopolimerą. Medžiagos tankis, šiluminis laidumas ir poringumas priklauso nuo sudėtinių medžiagų kiekio ir santykio [33]. Y. Ma, J. Hu ir G. Ye ištyrė šarmo aktyvatoriaus (skystojo stiklo) tirpalo SiO_2 ir Na_2O kiekio įtaką šarmu aktyvuotų pelenų pagrindinėms savybėms. Natrio oksido kiekio didinimas turi įtakos hidratacijos reakcijos trukmei, tankesnei medžiagos matricai ir padidina kristalizacijos proceso tikimybę. Į šarminį tirpalą įpilamas silicio dioksidas sulėtina hidratacijos reakcijos greitį ir ceolito susidarymą, tuo pačiu pagerindamas matricos mikrostruktūrą [34].

Vandens praradimas kietėjimo metu šarmu aktyvuotose medžiagose ženkliai didesnis nei naudojant portlandcementį kaip rišamąją medžiagą. F. Collins'as ir J. G. Sanjayan'as nustatė mezoporų pasiskirstymą džiūvimo metu. Cementinėje medžiagoje aktyvuojant šlaką – 82 %, o portlandcementinėje medžiagoje – 36,4 %. Džiūvimo metu ŠAM pasižymėjo mažesnėmis mezoporomis ir didesniu vandens praradimu, kai OPC tokiu vandens praradimu nepasižymėjo. Gauti rezultatai pagrindžia teoriją, jog dėl gausaus drėgmės kiekio praradimo mezoporose atsirandančios kapiliarinės tempimo jėgos yra svarbus faktorius, kuris tiesiogiai daro įtaką susitraukimo deformacijoms [35].

Šarminio aktyvavimo reakcijos greičiui ir kietėjimo proceso trukmei įtakos turi aktyvuojamo šlako sudėtyje įmaišytas fosfogipsas. Tai nustatė tyrėjai D. Vaičiukynienė, D. Nizevičienė ir kt. remiantis XRD analize teigia, jog hidratacijos metu susiformuoja Na_2SO_4 , kuris atsakingas už šarmu aktyvuojamos medžiagos rišimosi pradžios ir pabaigos trukmes [5].

Pastebėta, jog naudojant per daug arba per mažai skysto stiklo, gaunami per silpni arba per stiprūs cheminiai tirpalai, kurie yra netinkami šarmu aktyvuotų bandinių gamybai. Naudojant vandenilio peroksidą (H_2O_2), šarmu aktyvuotų medžiagų bandiniai išsipučia ir suformuoja poras. Didesnis medžiagos poringumas sumažina medžiagos gniuždomąjį stiprumą bei šiluminį laidumą [33]. Tokios medžiagos gali būti panaudojamos pastatų atitvarose kaip izoliacinės medžiagos.

1.5. Šarmu aktyvuotų medžiagų poringumo didinimas

Siekiant inovacijų šarmu aktyvuotų medžiagų gamyboje, buvo išrastos įvairios medžiagos, įskaitant ir labai porėtas. Poringos medžiagos fizikinės ir mechaninės savybės labai priklauso nuo to, kaip įvairių dydžių poros yra pasiskirsčiusios medžiagoje. Medžiagos, kurių bendras poringumas yra vienodas gali turėti visiškai skirtingas savybes dėl to, kad jose yra mažas skaičius didelių porų arba didelis skaičius mažų porų. Porėtų medžiagų struktūra gali būti išgaunama dviem atvejais: mechaniškai ir chemiškai. Mechaninis būdas, tai tešlos maišymas fiziškai su paruoštu putokšliu. Cheminis būdas, tai sureagavus deguoniui su įdėtinėmis medžiagomis ir išskiriant dujas. Dujų išsiskyrimas atlieka pagrindinį vaidmenį porėtos medžiagos struktūros susiformavimui [36].

Aukšta šarminio aktyvatoriaus koncentracija aktyvacijos metu leidžia ganėtinai lengvai suformuoti porėtos struktūros bandinius. Galima rasti panašumų tarp šio proceso ir autoklave išgaunamo aktytojo betono technologijos, kai dujodaras yra sumaišomas su rišamąją medžiaga ir suformuojamas uždaru porų tinklu pasižymintis gaminys. Praktikoje dažniausiai taikomi dujodarai: aliuminio pudra – reakcijos metu išskirianti vandenilio dujas, vandenilio peroksidas – reakcijos metu išskiriantis deguonį ir natrio karbonatas – išskiriantis anglies dioksidą. Šarminio aktyvavimo reakcija įvyksta per labai trumpą laiką, todėl dažnu atveju cementinės teslos maišymas atliekamas pačioje bandiniui formą suteikiančioje talpoje. Siekiant išgauti tinkamą porų išsidėstymą mikrostruktūroje, pirmiausia aliuminio pudra privalo būti sumaišyta su sausa rišamąją medžiaga ir tik po to aktyvuojama sumaišant su skystos agregatinės būsenos aktyvatoriumi. Toks aktyvavimo proceso eiliškumas užtikrina medžiagos ugniai atsparumo, cheminio atsparumo ir uždaru porų tinklo susiformavimo kokybę [37].

A. Hajimohammadi'is ir kt. ištyrė medžiagos poringumo susiformavimą mechaniniu būdu. Šis būdas pasirinktas dėl gebėjimo kontroliuoti medžiagos tankį ir putokšlio kiekį, o tai tiesiogiai turėjo įtakos šarminio aktyvavimo proceso efektyvumui. Porų pasiskirstymo vienodumas medžiagos matricoje yra ne mažiau svarbus nei porų pasiskirstymas pagal dydį. Nustatyta, jog didesnė putokšlio koncentracija turi įtakos mažesnių ir gausesnių porų susidarymui. Porėta matrica ženkliai sumažina medžiagos šiluminį laidumą ir veikia kaip efektyvus šilumos srauto barjeras. Medžiagos tankis priklauso nuo poringumo, todėl medžiagos, kurių tankis mažiausias, pasižymėjo mažiausiu šiluminiu laidumu. Tačiau negalima teigti, jog poringumas ir tankis yra pagrindiniai faktoriai darantys įtaką medžiagos šiluminiam laidumui, svarbus ir porų pasiskirstymas. Kuo daugiau oro porų yra išsidėsčiusių statmenai šilumos srautui, tuo šiluminis laidumas mažesnis. Šiluminis laidumas didėja, jeigu medžiagos poros išsidėsčiusios lygiagrečiai šilumos srautui [38].

V. Ducman'as ir L. Korat'as ištyrė aliuminio pudros ir H_2O_2 įtaką porėtos šarmu aktyvuotos medžiagos susidarymui cheminiu būdu. Buvo nustatyta, jog abi įdėtinės medžiagos sureagavusios su šarmu aktyvuota medžiaga pasižymėjo aukštu poringumu: aliuminio pudra – 59 %, vandenilio peroksidas (H_2O_2) – 48 %, tačiau skirtingais medžiagų tankiais. Aliuminio pudra, kuri sudarė 0,07 ir 0,2 % medžiagos masės, pasižymėjo 0,64–0,74 g/cm³ tankiu, o vandenilio peroksidas sudarydamas 0,5 ir 2,0 % medžiagos masės, 0,61–1,0 g/cm³ tankiu. Nustačius medžiagos gniuždomąjį stiprumą, patvirtino hipotezę, jog medžiagos stiprumo rodikliai tiesiogiai priklauso nuo medžiagos tankio, t. y. kuo tankesnė medžiaga, tuo atsparesnė gniuždymui [39].

Šarmu aktyvuotų medžiagų su aliuminio pudra ir vandenilio peroksidu poringumas nustatytas mikrotomografijos tyrimo metodu parodė, jog bandinių poros pasiskirsto tolygiai, tačiau skiriasi dydžiu. Bandinys su aliuminio pudra pasižymėjo didesnėmis poromis. Taip pat nustatyta, jog didelis įdėtinių medžiagų kiekis, sumažina porų kiekį, bet didina porų diametrą. Panaudoti optimalūs medžiagų kiekiai leidžia suformuoti bandinius, kurių šiluminės ir mechaninės savybės gali būti panaudojamos kuriant produktus apsaugančius nuo aukštos temperatūros poveikio [39].

Porėtos cementinės medžiagos plačiai taikomos kaip šilumos barjerai, kurie neleidžia šilumos energijai lengvai pasišalinti iš pastato. Porų dydis, pasiskirstymas, medžiagos tankis ir užpildo tipas yra pagrindiniai faktoriai, kurie lemia šiluminės medžiagos savybes. Medžiagų mechanines savybes apibūdina gniuždomasis stiprumas, medžiagos tamprumo modulis, tankis ir V/C santykis. Porėtų medžiagų gniuždomasis stiprumas vyrauja nuo 1,0 MPa iki 10 MPa, tamprumo modulio reikšmė nuo 1,7 GPa iki 3,5 GPa, o tankis 360–1400 kg/m³. Porėta medžiaga gali būti gaunama į cementinę teslą įmaišius silicio dulkių. Kietėjimo proceso metu, 70 °C temperatūroje silicio dulkės reaguoja su

vandeniu, įvyksta silicio oksidacija ir išsiskiria vandenilio dujos. Šarminio aktyvavimo metu, kai formuojasi gelis, susikaupusios vandenilio dujos išsiskiria iš medžiagos taip suformuodamos porėtą medžiagos struktūrą. Porų dydis ir pasiskirstymas gali būti koreguojamas keičiant kietėjimo temperatūrą ir trukmę, o medžiagos šiluminis laidumas gali vyrauti intervale 0,22–0,24 W/m·K. Medžiagos pasižyminčios tokiomis šiluminėmis savybėmis, gali būti naudojamos izoliuoti statybines konstrukcijas ar atitvaras [40].

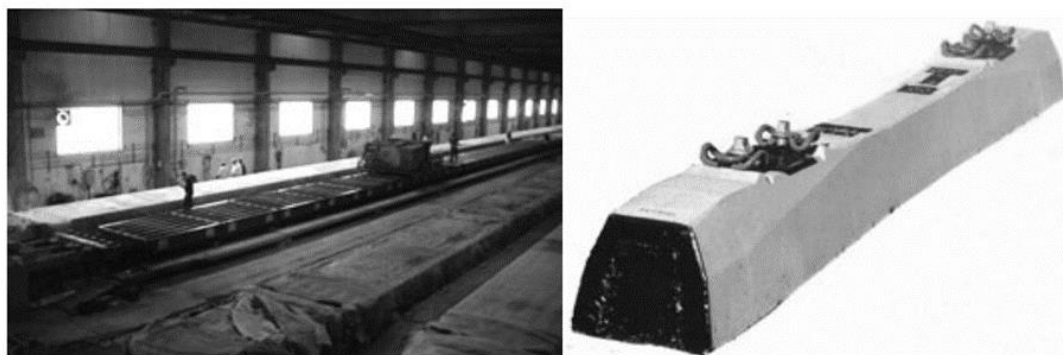
1.6. Šarmu aktyvuotų medžiagų pritaikymas

Betono pritaikomumas lėmė, jog jis taptų antru pagal kiekį sunaudojamu produktu visame pasaulyje, nusileidžiančiu tik vandens suvartojimui. Kiekvienais metais pagaminama ~10 mlrd. m³ betono, tai sudaro ~ 8 % bendro CO₂ išskyrimo į aplinką pasauliniu mastu. Pagrindinis CO₂ išskyrimo šaltinis, betono rišamosios medžiagos – portlandcemenčio gamyba [41]. Taip pat vis didėjantys atominių elektrinių, metalurgijos pramonės ir naudingųjų gamtinių išteklių kasybos atliekų kiekiai, priverčia susimąstyti apie šalutinių produktų panaudojimą.

Šarmu aktyvuojant gamybos pramonės šalutinius produktus, galima juos pritaikyti naujam eksploatacijos laikotarpiui ir panaudoti produktų gamyboje:

1. Gelžbetoninių konstrukcijų gamyboje:

- vamzdžių;
- takelių;
- kelių;
- oro uostų pakilimo takų;
- atraminių sienučių;
- pastatų konstrukcinių elementų;
- traukinių pabėgių;
- šulinių rentinių;
- elektros kabelių kanalų.



2 pav. Iš anksto įtempto gelžbetonio traukinių pabėgiai [42]



3 pav. Gelžbetoninis pėsčiųjų takas [42]

2. Betoninių konstrukcijų gamyboje:

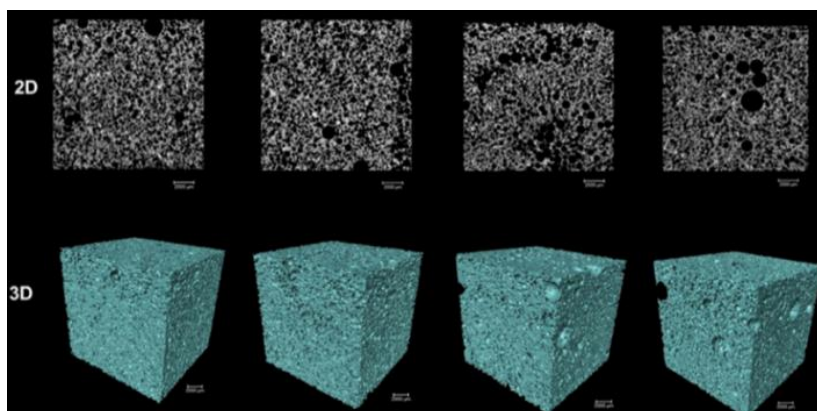
- pastato eksterjero plytelių;
- sieninių plokščių.

3. Skiedinių ir mišinių gamyboje:

- ugniai atsparių dangų;
- cheminiai korozijai atsparių dangų.

4. Porėtų ir lengvų medžiagų gamyboje:

- porėto betono;
- izoliacinių medžiagų.



4 pav. Šarmu aktyvuoto porėto betono kubelio 2D ir 3D projekcijos [39]



5 pav. Šarmu aktyvuoto metalurginio šlako betonas panaudotas daugiabučio laikančiosiose konstrukcijose [1]

1987 metais buvusios sovietų sąjungos (šiuo metu Rusijos federacijos) teritorijoje – Lipetske, pirmą kartą panaudotos šarmu aktyvuotos medžiagos gyvenamojo pastato statyboje. Daugiabučio gyvenamojo namo blokai pagaminti iš šarmu aktyvuoto metalurginio šlako betono. Praėjus 25 metų pastato eksploatacijos laikotarpiui nebuvo pastebėta konstrukcinių defektų, kurie galėtų kelti pavojų tolesniam pastato eksploatavimui. Taip pagrindžiamas šarmu aktyvuotų medžiagų ilgalaikiškumas ir gebėjimas išlaikyti pirmines medžiagų charakteristikas sąlyginai agresyvioje aplinkoje [1].

Naujausios medžiagų mokslo technologijos yra plačiai taikomos ir šių dienų statinių konstrukcinių elementų gamyboje. Queensland'o klimato kaitos institutas Australijoje yra puikus inovatyvių konstrukcinių sprendimų pavyzdys šiuolaikiniame statybos sektoriuje. Pastato konstrukciniai elementai suprojektuoti naudojant perdirbtas, tvarias ir aplinką tausojančias medžiagas. Pastato surenkamos perdangos plokštės suprojektuotos iš šarmu aktyvuoto gelžbetonio. Betono mišinys pasižymėjo mažomis susitraukimo deformacijomis, aukštomis gniuždomojo stiprumo savybėmis be vizualiai pastebimų plyšių [43].



6 pav. Perdangos plokštės pagamintos iš šarmu aktyvuotų medžiagų montavimas [43]



7 pav. Queensland'o klimato kaitos instituto pastatas Australijoje [43]

1.7. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Literatūros analizė atlikta remiantis mokslinėje literatūroje pateiktais lakiųjų pelenu, šlako ir metakaolino žaliavų šarminio aktyvavimo tyrimų rezultatais. Analizuoti literatūros šaltiniai aprašantys porėtos ir neporėtos struktūros medžiagas. Nustatyta, jog porėtų šarmu aktyvuotų medžiagų tyrimų yra atliekama mažiau, lyginant su neporėtomis. Remiantis R. M. Novais'o ir kt. analize, publikuotų mokslinių straipsnių skirtumas siekia iki 30 kartų. Tiriamas ribotas spektras medžiagos savybių, o pritaikymo galimybės aprašomos paviršutiniškai [44]. Todėl porėtos struktūros, šarmais aktyvuotų medžiagų tyrinėjimas yra aktualus ir svarbus dėl informacijos trūkumo.

Mechaninės savybės, poringumo parametrai, šilumos laidumas ir gebėjimas atlaikyti aukštą temperatūrą yra aktualiausios tiriamos medžiagos savybės, kurias siekiama nustatyti magistro baigiamajame darbe. Fosfogipso įmaišymas į šarmu aktyvuotos medžiagos sudėtį, galimai prisideda prie tinkamų hidratacijos produktų susiformavimo ir pagreitina hidratacijos procesą. Galimai turi įtakos medžiagos mechaninėms savybėms ir gebėjimui atlaikyti aukštą temperatūrą, todėl gali būti naudojamas kaip potencialus ekonomiškasis priedas, gerinantis medžiagos savybes.

2. Tyrimų metodologija

Skyriuje pateikiami tiriamajame darbe naudojami specializuoti tyrimo metodai ir jų taikymo logika. Aprašomi tyrimų instrumentai, jų panaudojimo ir įgyvendinimo sąlygos. Taip pat tyrime naudotos medžiagos ir pagrindinės jų charakteristikos.

2.1. Tyrimo metodai

Magistro baigiamojo darbo eksperimentinė dalis pradedama nuo žaliavų minerologinės ir elementinės sudėties analizės. Jos nustatomos naudojant pažangiausius tyrimo metodus, t. y. XRD ir XRF analizes. Medžiagų mikrostruktūra nustatoma remiantis elektroninės mikroskopijos tyrimo metodu. Dalelių dydis ir forma remiantis granulimetrine analize, o smulkumas – specifinio paviršiaus ploto nustatymo metodu. Medžiagų mechaninių savybių, poringumo ir šilumos laidumo vertės nustatomas specializuotais tyrimų metodais.

2.1.1. Rentgenostruktūrinė analizė (XRD)

Rentgenostruktūrinė analizė atlikta „Bruker AXS, Karlsruhe, Germany D8“ difraktometru. Naudota $\text{CuK}\alpha$ spinduliuotė ir Ni 0.02 mm filtras, detektoriaus judėjimo žingsnis – 0,02 °, intensyvumo matavimo trukmė žingsnyje – 0,5 s, anodinė įtampa $U_a = 40$ kV, srovės stiprumas $I = 40$ mA. Difrakcinės kreivės buvo papildomai užrašytos 2–60° 2 θ kampų intervale, naudojant plokščią galinį grafito monochromatorių ($d = 0,355$ nm) ir matuojant intensyvumą žingsnyje $\tau = 1$ s.

Rentgeno spinduliai, atsispindėję nuo skirtingų kristalinės gardelės plokštumų, interferuoja, t. y. stiprina vienas kitą, o detektorius fiksuoja smailę (piką) ties 2 θ kampu. Remiantis gauta rentgenograma, daromos išvados apie medžiagas sudarančius mineralus ir jų formavimosi bei skilimo tendencijas.

2.1.2. Rentgeno spindulių dispersijos fluorescencijos analizė (XRF)

Rentgeno spindulių dispersijos fluorescencijos analizė atlikta „Bruker X-ray S8 Tiger WD“ fluorescenciniu spektrometru. Buvo taikoma $U_a = 60$ kV anodinė įtampa ir $I = 130$ mA srovės stiprumas. Išsiskyrusi fluorescencinė spinduliuotė fiksuojama detektoriumi ir nustatoma informacija apie medžiagą sudarančius elementus.

2.1.3. Skenuojanti elektroninė mikroskopija (SEM)

Medžiagų mikrostruktūra nustatoma skenuojant elektroniniu mikroskopu FEI QUANTA 200F. Didelę skiriamąją gebą skenuojančiam elektroniniam mikroskopui FEI Quanta 200 FEG suteikia lauko Schottky srities emisijos patranka (FEG). Skenuojant naudotas aukšto vakuumo (HV) režimas – 5 kV.

2.1.4. Granulimetrinė analizė

Medžiagų dalelių dydžio, formos ir kiekio nustatymai atlikti remiantis lazeriniu granulionometru – „Mastersizer 2000“. Kaip dispersinė fazė naudotas izopropanolis, o kietosios medžiagos kiekis suspensijoje 13–15 %. Dalelių dispergavimo ultragarsu trukmė – 100 s, matavimo trukmė – 15 s. Bandymo metu, nustatomas medžiagas sudarančių dalelių dydžiai ir jų kiekių pasiskirstymas.

2.1.5. Specifinio paviršiaus ploto nustatymo metodas

Tiriamųjų medžiagų smulkumas yra išreiškiamas jų savituoju paviršiumi. Medžiagos savituoju paviršiumi vadinamas suminis kietųjų dalelių paviršius, tenkantis medžiagos masės vienetui (m^2/kg). Naudotų medžiagų savitasis paviršius buvo nustatytas oro pralaidumo metodu naudojant Bleino prietaisą, kurio veikimas pagrįstas oro prasiskverbimu pro tiriamosios medžiagos sluoksnį pasipriešinimo įvertinimu [45].

2.1.6. Atsparumo aukštai temperatūrai bandymas

Bandiniai po 28 parų kietėjimo yra kaitinami krosnelėje „SNOL 1,6.2,5./11-13“: 200 °C, 400 °C, 600 °C ir 800 °C laipsnių temperatūrose. Temperatūra keliami ~ 6 °C/min ir pasiekus reikiamos temperatūros ribą, kaitinami 2 valandas. Pasiekus 800 °C temperatūrą bandiniai papildomai kaitinami 3 valandas. Po kiekvieno aukštos temperatūros poveikio nustatomas bandinių tankio ir gniuždomojo stiprumo charakteristikos.

2.1.7. Gniuždomojo stiprumo savybių nustatymas

Bandinių gniuždomojo stiprumo bandymai po 3 ir 28 parų kietėjimo atliekami remiantis LST EN 12390-3:2019 keliamais reikalavimais. Tiriamų bandinių išoriniai matmenys – 2x2x2 cm kubeliai, kurie gniuždomi „Zwick Roell“ bandymų prietaisu. Gauti duomenys analizuojami ir apskaičiuojamas gniuždomojo stiprumo rodiklis f_{ck} , (MPa).

2.1.8. Oro porų pasiskirstymo skerspjūvyje nustatymas

Bandiniuose susiformavusių porų dydį, kiekį ir pasiskirstymą galima nustatyti remiantis makrofotografijos analize. Pirma, yra atliekamas cementinės medžiagos bandinio pjūvis, kad būtų aiškiai matoma bandinio struktūra. Bandinio paviršius yra šlifuojamas, kad medžiagos paviršiuje atsivertų bandinyje esančios poros ir vizualiai būtų matomas jų užimamas plotas. Bandinio paviršius dažomas greitai garuojančiais dažais, kurie neįsigeria į bandinio paviršių ir padeda tiksliai pažymėti poras bandinyje. Bandinio paviršius nuskaitomas aukštos rezoliucijos skaitmeniniu skaitytuvu. Gautiems vaizdams apdoroti naudojama „ImageJ“ programinė įranga. Siekiant gauti tikslus rezultatus, analizuojami 2–3 bandinių pjūviai.

2.1.9. Šiluminio laidumo koeficiento nustatymas

Šarmu aktyvuotos medžiagos šiluminio laidumo bandymas atliekamas remiantis LST EN 12667:2002 keliamais reikalavimais ir pateikta metodika. Tiriama trijų skirtingų sudėčių bandiniai, kurių matmenys – 300x300x50 mm. Siekiant išvengti drėgmės įtakos tyrimo rezultatams, bandiniai prieš atliekant šilumos laidumo koeficiento nustatymą išdžiovinti krosnelėje 60 °C temperatūroje 24 h laikotarpiui.

2.2. Tyrime naudotos medžiagos

2.2.1. Vanduo

Vanduo betono mišiniuose atlieka jungiamosios skystosios fazės funkciją, t. y. cementas reaguoja su vandeniu, vykstant hidratacijos procesui susidaro cementinis akmuo. Cementiniams ir betoniniams gaminiams naudojamas vanduo turi atitikti nurodytus LST EN 1008:2005 techninius reikalavimus:

1. Vandens cheminės savybės:

- chloridų kiekis vandenyje – $\text{Cl}^{-1} \leq 500 \text{ mg/l}$;
- sulfatų kiekis vandenyje – $\text{SO}_4^{-2} \leq 2000 \text{ mg/l}$;
- šarmų kiekis vandenyje – $\text{Na}_2\text{O} \leq 1500 \text{ mg/l}$.

2. Vandens pH turi būti ne mažesnis kaip 4,0 ir ne didesnis kaip 12,5;

3. Kitų žalingų įmaišų – cukraus, P_2O_5 , Pb^{2+} , Zn^{2+} leidžiamoji norma – iki 100 mg/l, NO_3 – iki 500 mg/l;

4. Vandenyje neturi būti naftos produktų plėvelės, riebalų, aliejaus, ir kitų panašių medžiagų;

5. Vandenyje neturi būti priemaišų, kurios trukdo rištis ir kietėti rišamajai medžiagai, taip pat priemaišų, kurios mažina betono stiprumą ir atsparumą šalčiui [46].

Tyrimo metu buvo naudotas geriamas vanduo iš universiteto laboratorijos vandentiekio sistemos, kuris atitinka keliamus reikalavimus ir jo nereikia papildomai tirti.

2.2.2. Natrio hidroksidas (NaOH)

Tyrimė naudotas baltos spalvos granuliuotas laboratorinis reagentas – NaOH. Kilmės šalis – Rusija.

Parametrai:

- koncentracija – $\geq 99,5 \%$;
- Na_2CO_3 – $\leq 1,0 \%$;
- NaCl – $< 0,002 \%$;
- Na_2SO_4 – $< 0,005 \%$;
- Fe (Fe_2O_3) – nuo 0,0005 % iki 0,0009 %;
- Hg^{+2} – nuo 0,00002 % iki 0,00003 %.

2.2.3. Vandenilio peroksidas (H_2O_2)

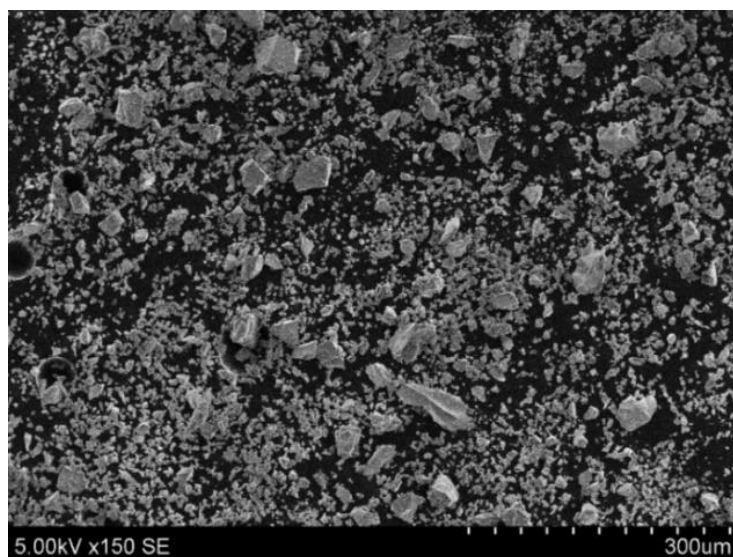
Šarmu aktyvuojamų medžiagų dujodaras – 35 % koncentracijos, bespalvis vandenilio peroksido tirpalas (H_2O_2). Kilmės šalis – Lenkija.

Parametrai:

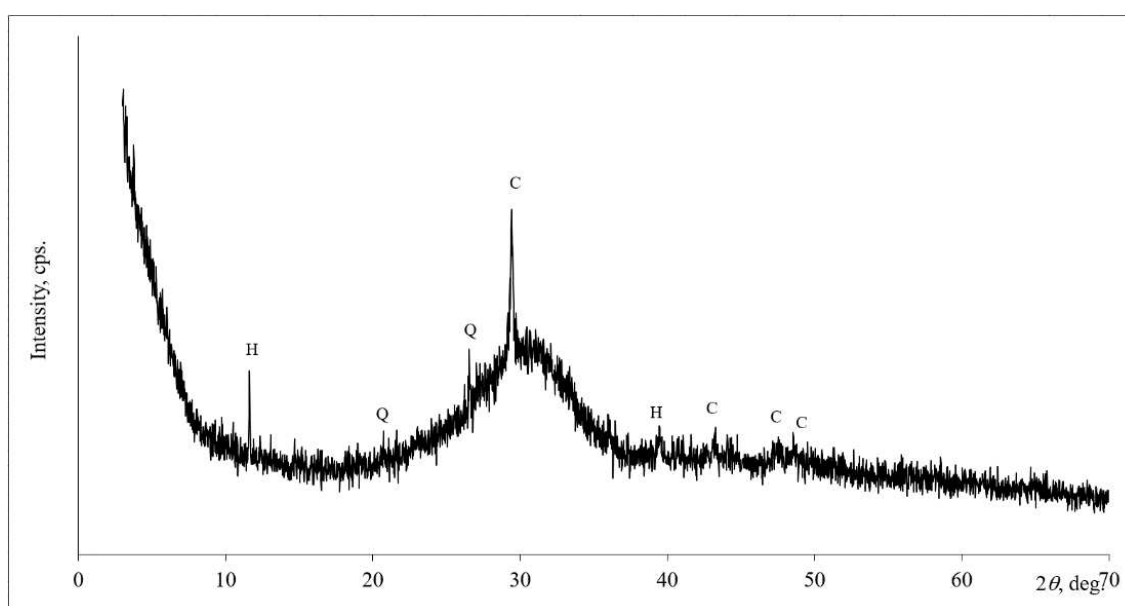
- laisvų rūgščių masės dalis – $\leq 0,02$;
- stabilumas (skaidymosi greitis 96 °C per 16 h) – $\leq 5 \%$;
- fosfatų (PO_4^{3-}) masės dalis – $\leq 300 \text{ mg/l}$.

2.2.4. Metalurginis šlakas

Granuliuotas šlakas gautas iš metalurgijos gamyklos Suomijoje. Laboratorijoje šlakas buvo džiovintas kambario temperatūroje ir sumaltas naudojant rutulinį malūną. Remiantis mikroskopine analize (8 pav.) matomos netaisyklingos formos, aštrių briaunų šlako dalelės. Šlako rentgenogramoje (9 pav.) matomos intensyvios smailės, priklausančios kalcio karbonato, kvarco ir hidrotalcito mineralams. Metalurginio šlako cheminė kompozicija pateikta 3 lentelėje. Remiantis granulimetrinės analizės rezultatais (10 pav.), 90 % šlako sudaro 202,89 μm dydžio dalelės. Metalurginio šlako miltelių savitasis paviršius remiantis Blaine'o prietaiso rezultatais – 207 m^2/kg .



8 pav. Metalurginio šlako SEM nuotrauka



9 pav. Metalurginio šlako XRD rentgenograma

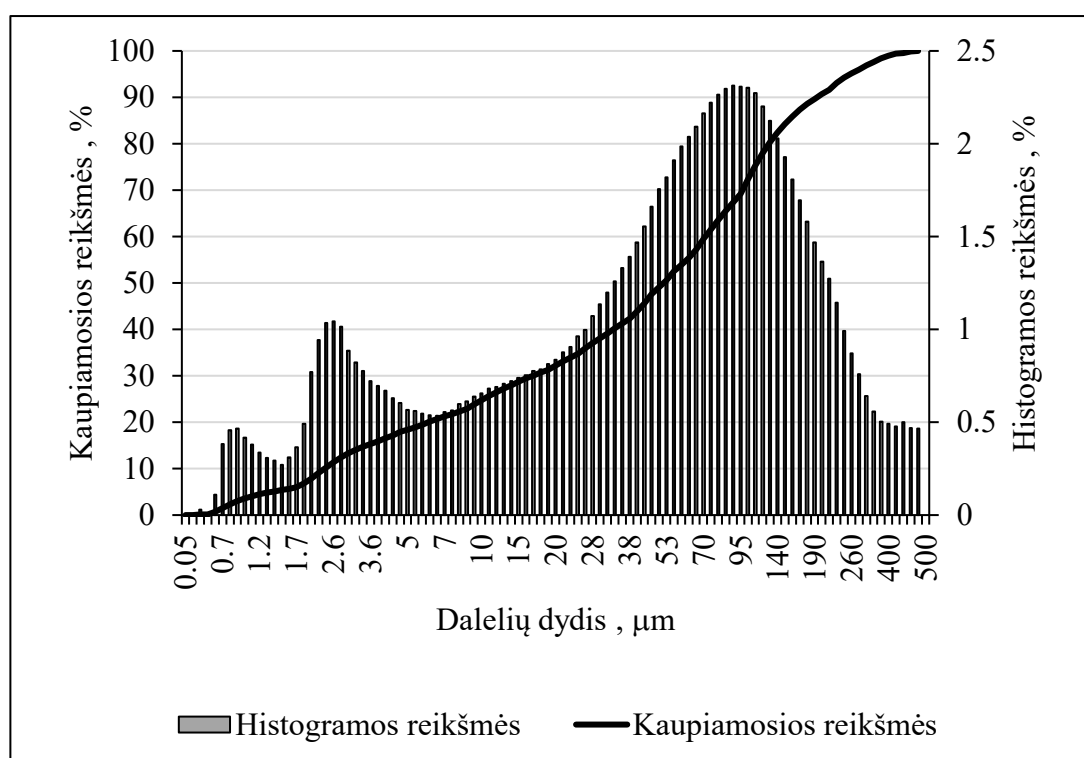
2 lentelė. Metalurginio šlako XRD rentgenogramos suvestinė

Eil. Nr.	Žymėjimas	Identifikacinis numeris	Junginio formulė	Junginio pavadinimas
1	C	72-1651	CaCO ₃	Kalcio karbonatas
2	Q	83-539	SiO ₂	Kvarcas
3	H	14-191	Mg ₆ Al ₂ CO ₃ (OH) ₁₆ ·4H ₂ O	Hidrotalcitas

3 lentelė. Metalurginio šlako cheminė sudėtis, remiantis XRF analize

Eil.Nr.	Junginys	Junginio pavadinimas	Kiekis, %
1	CaO	Kalcio oksidas	45,20
2	SiO ₂	Silicio dioksidas	37,10
3	Al ₂ O ₃	Aliuminio oksidas	6,44

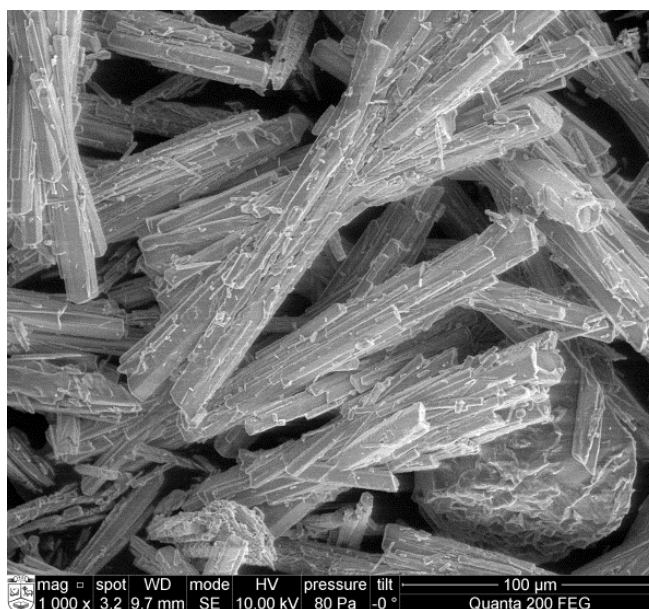
Eil.Nr.	Junginys	Junginio pavadinimas	Kiekis, %
4	MgO	Magnio oksidas	5,76
5	SO ₃	Sieros trioksidas	1,85
6	K ₂ O	Kalio oksidas	0,517
7	TiO ₂	Titano oksidas	0,285
8	Fe ₂ O ₃	Geležies (III) oksidas	0,793
9	P ₂ O ₅	Fosforo pentoksidas	1,02
11	BaO	Bario oksidas	0,068
12	SrO	Stroncio oksidas	0,069
13	ZrO ₂	Cirkonio oksidas	0,02
14	Na ₂ O	Natrio oksidas	1,02



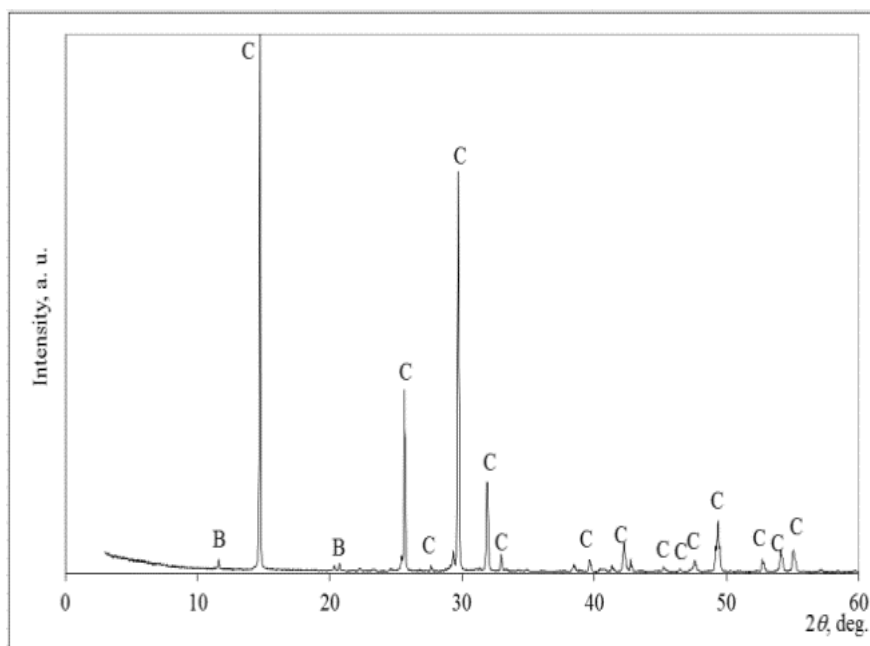
10 pav. Metalurginio šlako granulimetrinė sudėtis

2.2.5. Fosfogipsas

Tyrimė naudotas fosfogipsas priskiriamas prie α pushidračio tipo, gautas iš trąšų gamybos įmonės – AB „Lifosa“. Fosfogipsas susiformuoja išgaunant fosforinę rūgštį iš gamtinio apatito. Gauti medžiagos milteliai laboratorijoje buvo džiovunami 100 ± 5 °C. Remiantis mikroskopine analize (11 pav.) pastebėti tankios struktūros ir netaisyklingos formos pushidračio fosfogipso kristalai. Fosfogipso rentgenogramoje (12 pav.) matomos intensyvios smailės, priklausančios basanitui ir mažo intensyvumo smailės būdingos brušito junginiui. Remiantis granulimetrinės analizės rezultatais (13 pav.), 90 % fosfogipso sudaro 19,98 μm dydžio dalelės. Fosfogipso miltelių savitasis paviršius nustatytas Blaine'o prietaisu – 201 m^2/kg . Fosfogipso cheminė sudėtis pateikta 5 lentelėje.



11 pav. Fosfogipso SEM nuotrauka



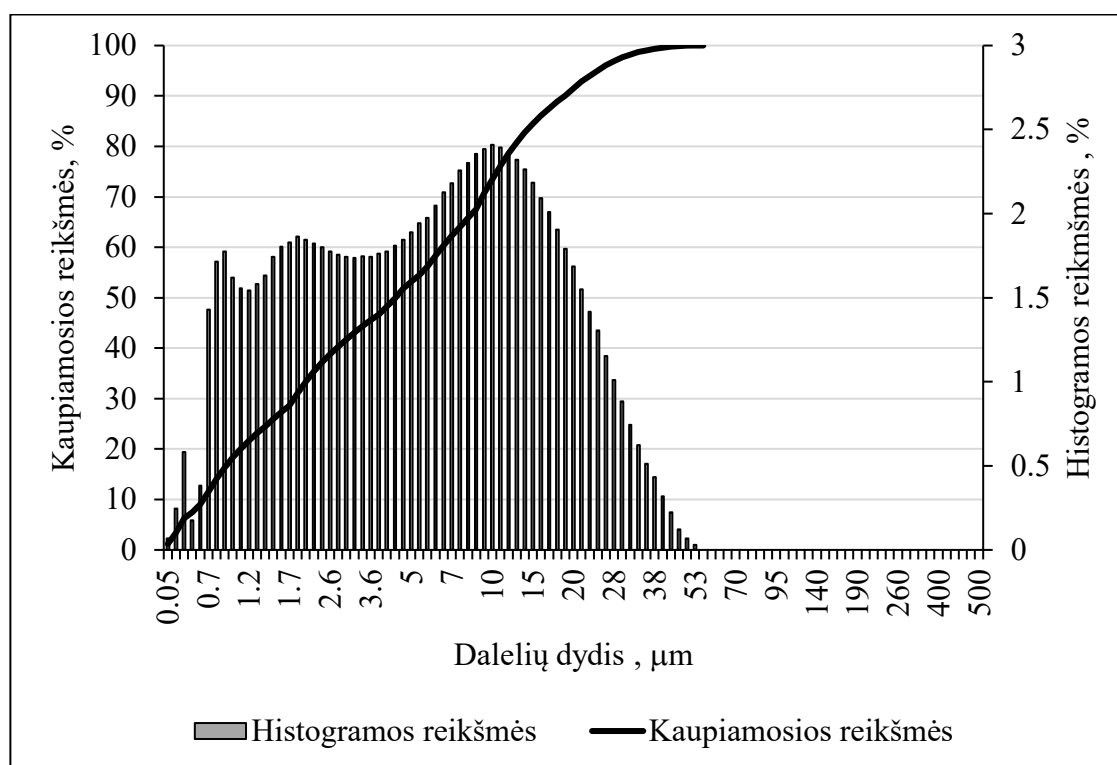
12 pav. Fosfogipso XRD rentgenograma

4 lentelė. Fosfogipso XRD rentgenogramos suvestinė

Eil. Nr.	Žymėjimas	Identifikacinis numeris	Junginio formulė	Junginio pavadinimas
1	C	33-310	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	Basanitas
2	B	11-293	$\text{CaPO}_3 \cdot (\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Brušitas

5 lentelė. Fosfogipso cheminė sudėtis, remiantis XRF analize

Eil.Nr.	Junginys	Junginio pavadinimas	Kiekis, %
1	CaO	Kalcio oksidas	39,06
2	SiO ₂	Silicio dioksidas	0,34
3	Al ₂ O ₃	Aliuminio oksidas	0,07
4	MgO	Magnio oksidas	0,21
5	SO ₃	Sieros trioksidas	52,71
6	Fe ₂ O ₃	Geležies (III) oksidas	0,04
7	P ₂ O ₅	Fosforo pentoksidas	1,61
8	F	Fluoras	0,06



3. Rezultatai ir diskusija

Skyriuje pateikiamos šarmu aktyvuotos medžiagos sudėties parinkimo ir medžiagos paruošimo technologija, bandymų rezultatai ir jų priklausomybės. Pateikiamos ankstyvojo (po 3 parų kietėjimo) medžiagos tankio ir gniuždomojo stiprumo savybės, vėlyvojo (po 28 parų kietėjimo) medžiagos tankio ir gniuždomojo stiprumo savybės, oro porų pasiskirstymo skerspjūvyje tendencijos, šilumos laidumo vertės, medžiagos savybių priklausomybės nuo temperatūros poveikio ir mineralinės sudėties rentgenogramos.

3.1. Šarmu aktyvuotos medžiagų sudėtys ir paruošimas

Pramonėje susidarančių atliekų antrinio panaudojimo galimybėmis gali pasinaudoti valstybės, kurios pasiruošusios spręsti klimato kaitos problemą, mažinant CO₂ išskyrimą pramonės sektoriuje. Aliumosilikatų prisotintos medžiagos tokios kaip: šlakas, pelenai ir metakaolinas gali pasiūlyti alternatyvas šiais laikais plačiai taikomoms portlandcementinės kilmės medžiagoms. Baigiamajame darbe naudojamos šlako ir fosfogipso žaliavos, kurias bandoma pritaikyti antrinio panaudojimo tikslais.

Šlako ir fosfogipso šarminiam aktyvavimui pasirinktas natrio hidroksido tirpalas, o porėtos struktūros formavimui – 35 % koncentracijos vandenilio peroksidas. Žaliavų aktyvavimui pasirinkti medžiagų kiekiai remiantis moksliniais literatūros šaltiniais ir laboratoriniais bandymais, siekiant išgauti reikiamų savybių produktą. Sausų medžiagų, t. y. šlako ir fosfogipso, kiekiai parinkti remiantis racionalios sudėties paieškos principu, kai vienos medžiagos kiekis mažinamas, o kitos – didinamas. Natrio šarmo, vandens ir vandenilio peroksido kiekiai atitinkamai mažinami ir didinami, kol išgryninamas tinkamas konkrečios medžiagos kiekis. Kaip alternatyva vandenilio peroksidui buvo naudojama aliuminio pudra, tačiau laboratorinių bandymu metu pastebėtas labai spartus medžiagos rišimasis ir kietėjimas, dėl kurio nebuvo galima tinkamai suformuoti bandinių. Išbandytas 0,1–0,2 % aliuminio pudros įkomponavimas į sudėtį nepasiteisino, todėl tolimesniuose tyrimuose buvo nuspręsta naudoti 2 % vandenilio peroksido.



14 pav. Baigiamajame darbe naudojamos medžiagos: 1-šlakas, 2-fosfogipsas, 3-granuluotas natrio šarmas (NaOH), 4-vanduo (H₂O), 5 – vandenilio peroksidas (H₂O₂)

Pasirinktos 5 skirtingos sudėtys, kurios analizuojamos baigiamajame darbe. Remiantis šiomis sudėtimis buvo ištirtos medžiagų savybės ir nustatytos priklausomybės nuo fosfogipso kiekio sudėtyje, kurios palygintos su kontrolinės sudėties (Nr. 1) rezultatais. Kintamos sudėties žaliavos – fosfogipsas ir šlakas, nekintamos – natrio šarmas, vanduo ir vandenilio peroksidas, kurie skaičiuojami procentine dalimi nuo bendro sausų medžiagų kiekio.

6 lentelė. Baigiamajame darbe analizuojamų mišinių sudėtys.

Sudėtis Nr.	Šlakas, %	Fosfogipsas, %	NaOH, %	H ₂ O, %	H ₂ O ₂ , %
Sudėtis Nr. 1	100	0	9,71	27,0	2,0
Sudėtis Nr. 2	97	3	9,71	27,0	2,0
Sudėtis Nr. 3	95	5	9,71	27,0	2,0
Sudėtis Nr. 4	93	7	9,71	27,0	2,0
Sudėtis Nr. 5	90	10	9,71	27,0	2,0

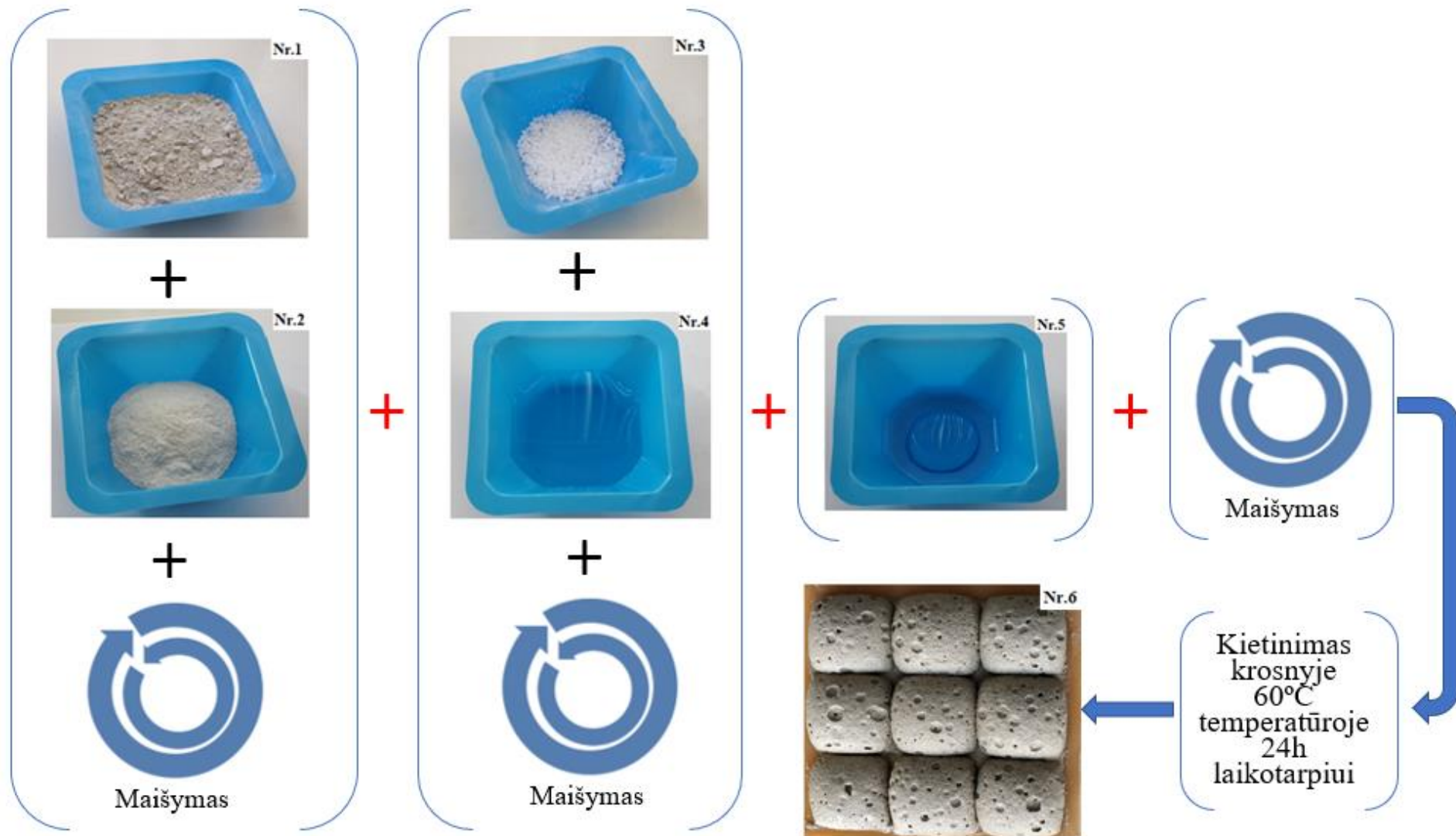
7 lentelė. Baigiamajame darbe analizuojamų mišinių sudėčių tūrinė išėiga.

Sudėtis Nr.	Šlakas, kg/m ³	Fosfogipsas, kg/m ³	NaOH, kg/m ³	H ₂ O, kg/m ³	H ₂ O ₂ , kg/m ³
Sudėtis Nr. 1	1389,0	0	135,0	375,0	28,0
Sudėtis Nr. 2	1347,0	42,0	135,0	375,0	28,0
Sudėtis Nr. 3	1319,0	69,0	135,0	375,0	28,0
Sudėtis Nr. 4	1292,0	97,0	135,0	375,0	28,0
Sudėtis Nr. 5	1250,0	139,0	135,0	375,0	28,0

Šarmu aktyvuotos medžiagos gamybos procesas išskaidytas į penkias fazes:

- 1-oji fazė – žaliavų kiekių svėrimas priklausomai nuo sudėties. Sausų medžiagų maišymas tarpusavyje, granuliuoto aktyvatoriaus tirpinimas vandenyje ir sausų medžiagų aktyvavimas. Tešlos maišymas ir dujodaro integravimas į sudėtį.
- 2-oji fazė – šarmu aktyvuotos tešlos pylimas į formas ir tankinimas. Po sutankinimo tešla formose izoliuojama kambario temperatūroje 24 h laikotarpiui.
- 3-oji fazė – nepažeidus sandarumo, medžiagos kietinimas 60 °C temperatūroje įkaitintoje krosnelėje 24 h laikotarpiui.
- 4-oji fazė – šarmu aktyvuotos medžiagos išformavimas ir izoliavimas 3–28 parų laikotarpiui, priklausomai nuo planuojamų bandymų.
- 5-oji fazė – po nustatyto izoliacijos laikotarpio pabaigos, bandiniai apdorojami ir tiriami specializuotais tyrimų metodais.

Pirmoje fazėje integravus dujodarą į šarmu aktyvuotą medžiagą buvo pastebėta aktyvi reakcija – putojimas ir medžiagos pūtimasis. Antroje fazėje, šarmu aktyvuotos medžiagos bandiniai supilti į 2x2x2 cm silikonines formas pasižymėjo greitu išsipūtimu, kuris prasidėjo nuo 1 fazės ir truko 10–15 min. Kiekviena sudėtis pasižymėjo skirtingomis išsipūtimo ir reakcijos aktyvumo savybėmis (žr. 1 priedą). Vizualiai pastebėtas mažesnis bandinių išsipūtimas ir greitesnė reakcija dujodaro integravimo metu didinant fosfogipso kiekį sudėtyje. Po 3-ios fazės, sudėčių Nr. 1–Nr. 3 bandiniuose pokyčių pastebėta nebuvo, tačiau pastebėtas sudėčių Nr. 4 ir Nr. 5 bandinių porėtumo slūgimas. Prieš atliekant šarmu aktyvuotos medžiagos supylimą, formas buvo išteptos tepalu dėl lengvesnio bandinių išformavimo. Šarmu aktyvuotos medžiagos gamybos technologinis principas pavaizduotas 15 paveiksle, o medžiagos išsipūtimo rezultatai – 1 priede.



15 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos gamybos technologija

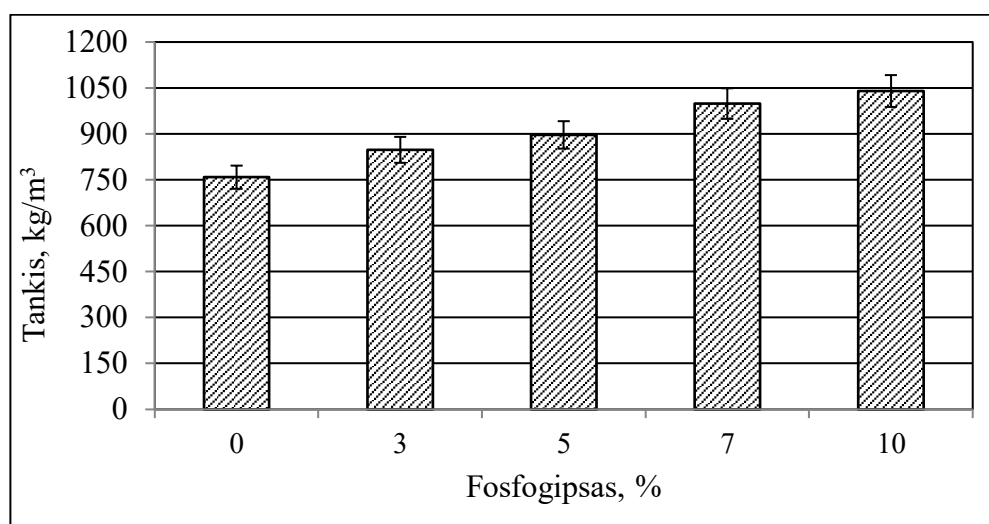
1-šlakas, 2-fosfogipsas, 3-granuliuotas natrio šarmas (NaOH), 4-vanduo (H₂O), 5-vandenilio peroksidas (H₂O₂), 6-šarmu aktyvuota medžiaga

3.2. Šarmu aktyvuotos medžiagos savybės, po 3 parų kietėjimo

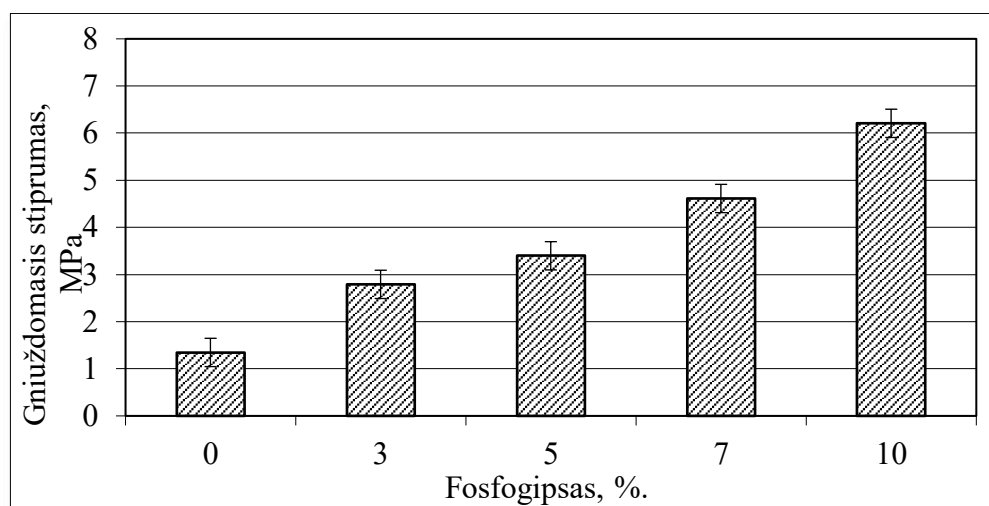
Analizuojamos šarmu aktyvuotos kompozitinės medžiagos tankio bei gniuždomojo stiprumo savybės ir priklausomybės. Gauti rezultatai lyginami su kitų tyrėjų, mokslinėje literatūroje, pateikta informacija.

3.2.1. Tankis ir gniuždomasis stiprumas

Penkių skirtingų sudėčių (6 lentelė) bandiniams nustatytos tankio ir gniuždomojo stiprumo savybės, po 3 parų kietėjimo. Bandinių tankis kinta intervale tarp 758–1040 kg/m³ (16 pav.), o gniuždomasis stiprumas 1,35–6,21 MPa (17 pav.), priklausomai nuo fosfogipso kiekio sudėtyje. Pasitvirtino hipotezė, jog medžiagos stipruminės savybės tiesiogiai priklauso nuo medžiagos tankio. Mažiausiu tankiu pasižymėjo sudėties Nr. 1 bandiniai su 0 % fosfogipso sudėtyje ($\rho = 758 \text{ kg/m}^3$), didžiausias tankis buvo nustatytas sudėties Nr. 5 bandiniams su 10 % fosfogipso sudėtyje ($\rho = 1040 \text{ kg/m}^3$). Bandyme naudota kiekvienos sudėties 3-jų bandinių imtis.



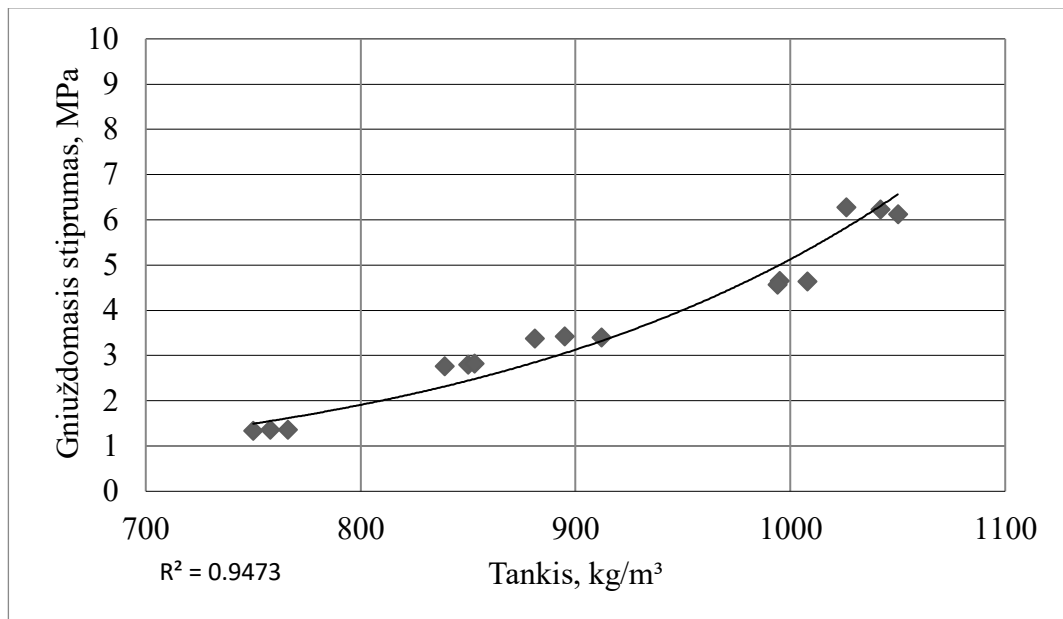
16 pav. Tankio ir fosfogipso kiekio mišinyje priklausomybė, po 3 parų kietėjimo



17 pav. Gniuždomojo stiprumo ir fosfogipso kiekio mišinyje priklausomybė, po 3 parų kietėjimo

Remiantis tyrimo rezultatais galima teigti, jog šarmu aktyvuoto šlako ir fosfogipso medžiaga pasižymėjo aukštomis mechaninėmis savybėmis ankstyvoje stadijoje, kadangi po 3 parų hidratacijos

įgavo 64–88 % galutinio stiprumo. Remiantis tankio ir gniuždomojo stiprumo grafiku (18 pav.), pastebėta šių savybių eksponentinė koreliacija. Bandiniai su 3 % fosfogipso sudėtyje, pasižymėjo 107,2 % gniuždomojo stiprumo ir 11,8 % tankio padidėjimu, lyginant su kontroliniu bandiniu.



18 pav. Tankio ir gniuždomojo stiprumo priklausomybė, po 3 parų kietėjimo



19 pav. Gniuždomojo stiprumo nustatymo įranga

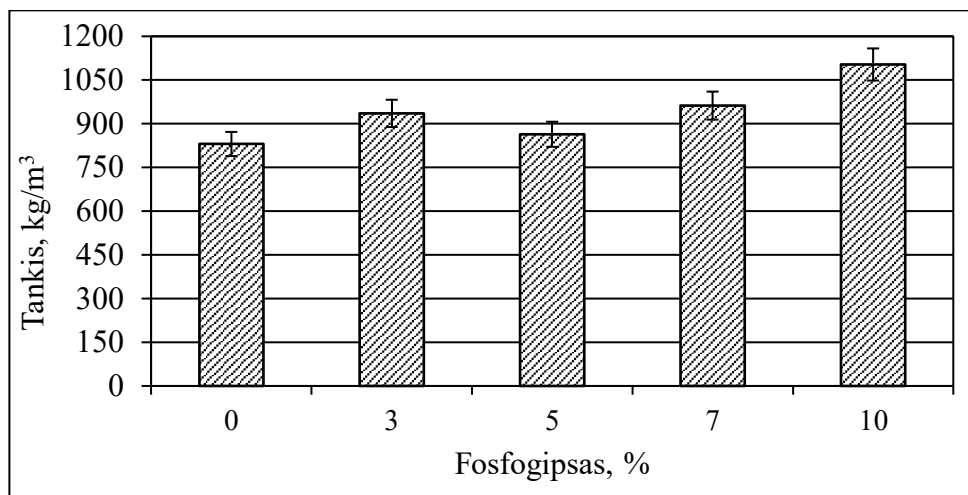
3.3. Šarmu aktyvuotos medžiagos savybės, po 28 parų kietėjimo

Analizuojami šarmu aktyvuotos kompozitinės medžiagos tankio ir gniuždomojo stiprumo rezultatai, po 28 parų kietėjimo ir nustatoma jų tarpusavio priklausomybė. Aprašomas oro porų pasiskirstymas skirtingų sudėčių bandiniuose, analizuojami medžiagos šilumos laidumo rezultatai, mineralinės bandinių sudėtys ir mechaninių bei fizikinių savybių pokyčiai po aukštų temperatūrų poveikio.

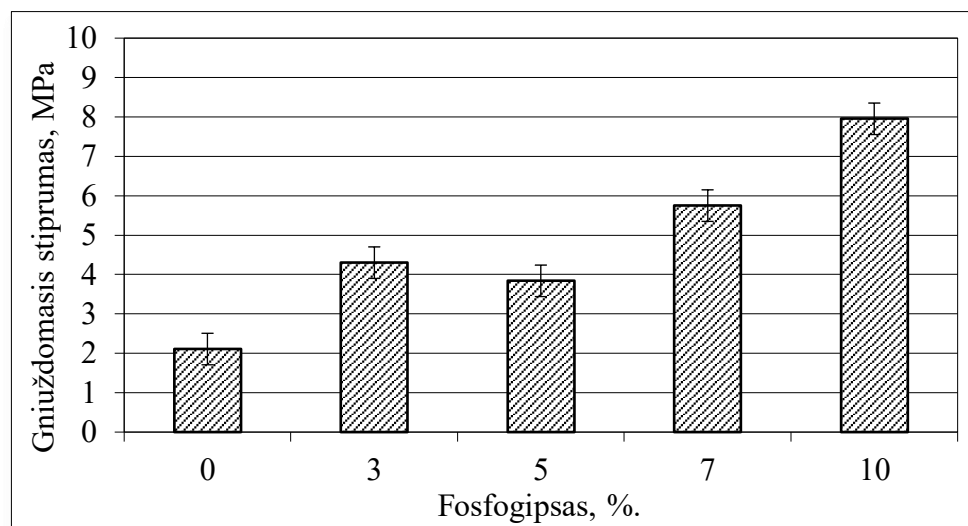
3.3.1. Tankis ir gniuždomasis stiprumas

Penkių skirtingų sudėčių (6 lentelė) bandiniams nustatytos tankio ir gniuždomojo stiprumo savybės, po 28 parų hidratacijos. Bandinių tankis kinta intervale tarp 830–1103 kg/m³ (20 pav.), o gniuždomasis stiprumas 2,11–7,95 MPa (21 pav.), priklausomai nuo fosfogipso kiekio sudėtyje. Šiuo atveju taip pat pasitvirtino hipotezė, jog medžiagos stipruminės savybės tiesiogiai priklauso nuo medžiagos tankio.

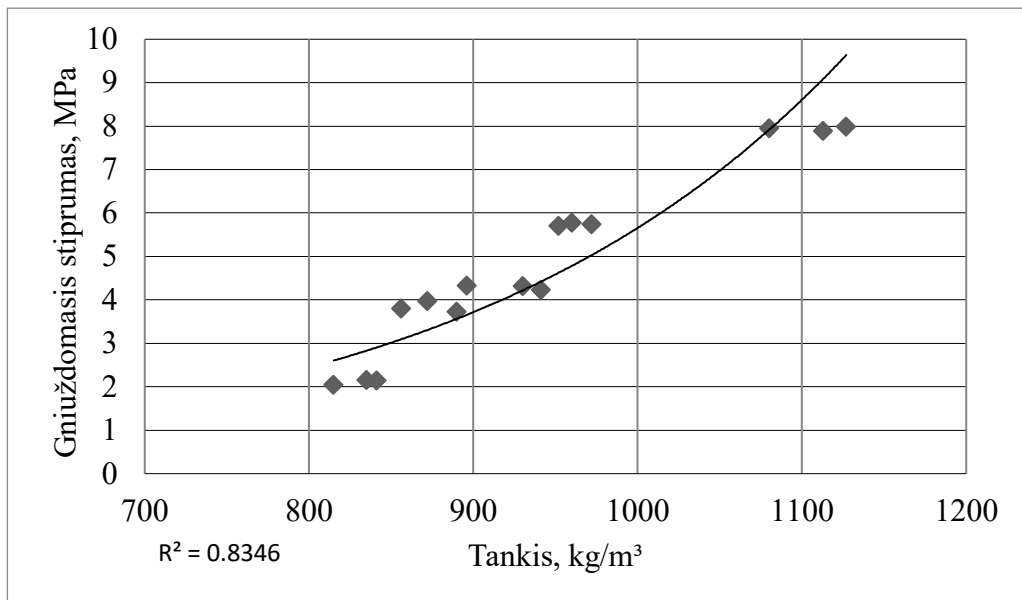
Gniuždomojo stiprumo charakteristikos tampriai susijusios su fosfogipso kiekiu sudėtyje. Didinant fosfogipso kiekį pastebėtas gniuždomojo stiprumo didėjimas. Tačiau po 28 parų kietėjimo pastebėta, jog į medžiagos sudėtį įmaišius 5 % fosfogipso, tankio ir gniuždomojo stiprumo reikšmės sumažėjo lyginant su 3 % fosfogipso sudėtyje.



20 pav. Tankio ir fosfogipso kiekio mišinyje priklausomybė, po 28 parų kietėjimo



21 pav. Gniuždomojo stiprumo ir fosfogipso kiekio mišinyje priklausomybė, po 28 parų kietėjimo 41



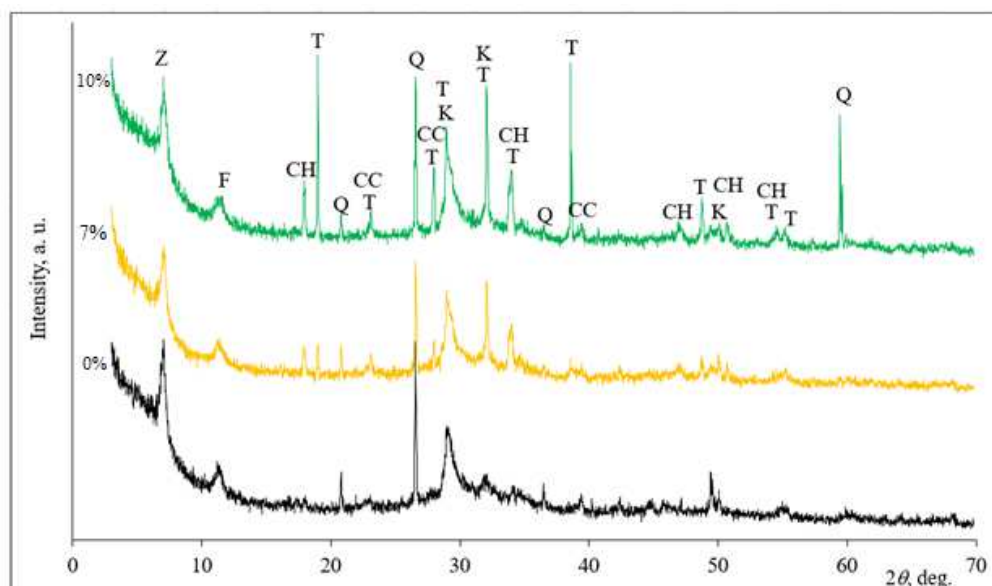
22 pav. Tankio ir gniuždomojo stiprumo priklausomybė, po 28 parų kietėjimo

Šarmu aktyvuotos medžiagos gniuždomojo stiprumo ir tankio rodikliai po 28 parų kietėjimo koreliuoja, kadangi matomas priklausomybės kreivės eksponentinis augimas (22 pav.). Bandiniai su 3 % fosfogipso sudėtyje, pasižymėjo 103,9 % gniuždomojo stiprumo ir 12,7 % tankio padidėjimu, lyginant su kontroliniu bandiniu.

Z. Zhang'o, J. L. Provis ir kt. tyrime pateikti duomenys, jog porėtų šarmu aktyvuotų medžiagų gniuždomasis stiprumas vyravo nuo 1,0 MPa iki 10 MPa, o tankis nuo 360–1400 kg/m³ [40]. Remiantis baigiamajame darbe nustatytais reikšmėmis, galima teigti, jog gniuždomojo stiprumo ir tankio vertės yra artimos moksliniuose šaltiniuose pateiktoms vertėms.

3.3.2. Porėtos šarmu aktyvuotos medžiagos mineralinė sudėtis, po 28 parų kietėjimo

Trijų skirtingų sudėčių (6 lentelė) bandiniams buvo atliktos XRD analizės po 28 parų kietėjimo. Nustatyti kambario temperatūroje susiformavę mineralai, kai į medžiagos sudėtį įmaišyta: 0 %, 7 % ir 10 % fosfogipso.



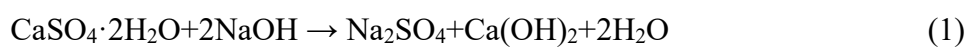
23 pav. Porėtos šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 28 parų kietėjimo

8 lentelė. XRD rentgenogramos suvestinė

Eil. Nr.	Žymėjimas	Identifikacinis numeris	Junginio formulė	Junginio pavadinimas
1	K	33-306	$\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5}\text{H}_2\text{O}$	Kalcio hidrosilikatas (C-S-H)
2	Q	83-539	SiO_2	Kvarcas
3	T	74-2036	Na_2SO_4	Tenarditas
4	CC	72-1937	CaCO_3	Kalcitas
5	F	14-191	$\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Hidrotalcitas
6	CH	84-1268	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlanditas
7	Z	80-1579	$\text{Ca}_2\text{Al}((\text{AlSi})_{1.11}\text{O}_2)(\text{OH})_{12}(\text{H}_2\text{O})_{2.25}$	Kalcio aliumosilikato hidratas

Remiantis XRD analizės rentgenograma (23 pav.), nustatytos vyraujančios kvarco, hidrotalcito ir kalcito mineralams priklausančios smailės, bandiniuose turinčių: 0 %, 7 % ir 10 % fosfogipso. Šie trys mineralai liko nesureagavę po šarminio aktyvavimo proceso, tačiau susiformavo nauji junginiai: kalcio hidrosilikatas (C-S-H) ir kalcio aliumosilikato hidratas. Šarminio aktyvavimo metu, fosfogipsas reagavo su natrio šarmu ir suformavo naujus mineralus, t. y. tenarditą ir portlanditą. Medžiagos sudėtyje vyraujant 7 % ir 10 % fosfogipso, nustatytas didesnis portlandito ir tenardito mineralų kiekis.

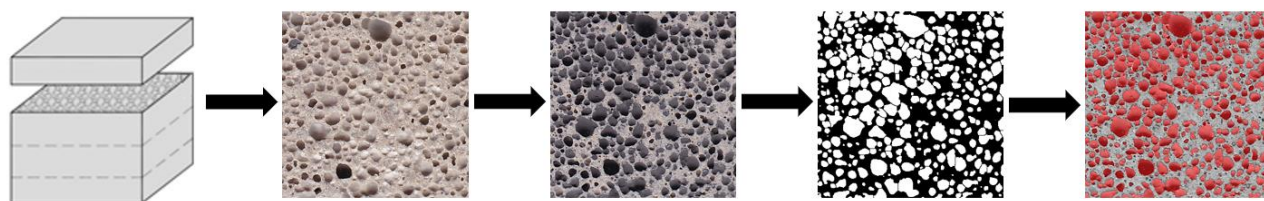
Fosfogipso ir natrio šarmo reakciją pagrindžianti (1) formulė:



Šarminio aktyvavimo metu susiformavęs tenarditas padidino mišinio pH, pagreitino šlako tirpinimą ir pucolaninę reakciją tarp portlandito ir šlako. Rentgenogramoje nustatytas mažas C-S-H gelio kiekis ties 2θ kampu ir $29,5^\circ$, tačiau į medžiagos sudėtį įmaišius papildomai fosfogipso, nustatytos intensyvesnės C-S-H smailės, lyginant su kontroliniu bandiniu. Galima daryti išvadą, jog fosfogipso įmaišymas į šarmu aktyvuojamo šlako sudėtį, turi įtakos C-S-H, CaCO_3 ir Na_2SO_4 mineralų kiekio susiformavimui, kurie koreliuoja su nustatytais gniuždomojo stiprumo vertėmis.

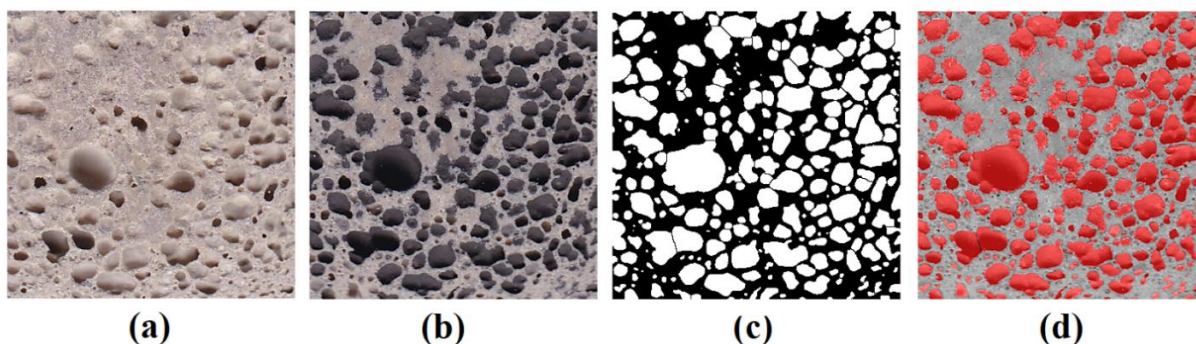
3.3.3. Oro porų pasiskirstymas skerspjūvyje

Oro porų dydis ir jų pasiskirstymas sukietėjusioje cementinėje medžiagoje nulemia pagrindines fizikines ir mechanines savybes. Baigiamajame darbe analizuojamos 6 lentelėje nurodytų sudėčių oro porų dydžio ir jų pasiskirstymo skerspjūvyje tendencijos, remiantis makrofotografijos analizės metodu. Bandyme naudoti 2x2x2 cm kubeliai, kurių paviršius nuskaitomas aukštos rezoliucijos skaitytuvu ir išryškinamos oro porų sudarytos tuštumos, naudojant specializuotą kompiuterinę programinę įrangą.

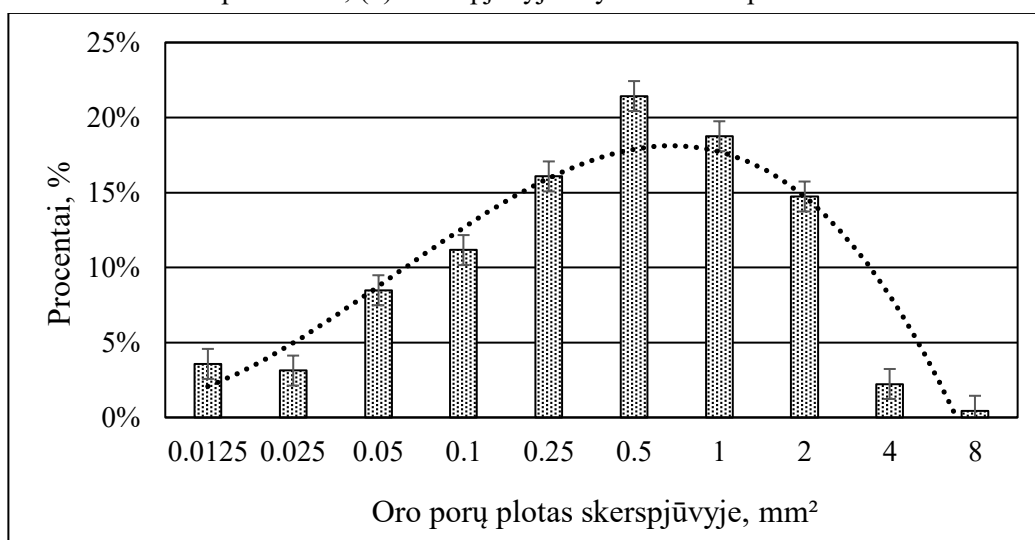


24 pav. Oro porų pasiskirstymo skerspjūvyje nustatymo principinė schema

Nustatyta, jog sudėties Nr. 1 bandinio oro porų dydis vyrauja intervale tarp 0,0125–8 mm², iš kurių didžiausią, t. y. 21,4 %, sudaro 0,5 mm² dydžio poros. Sudėties Nr. 1 bandinio nuotraukose (25 pav.) matomas tolygus netaisyklingos formos oro porų pasiskirstymas skerspjūvyje. Nustatytas oro porų plotas skerspjūvyje – 47,5 %.

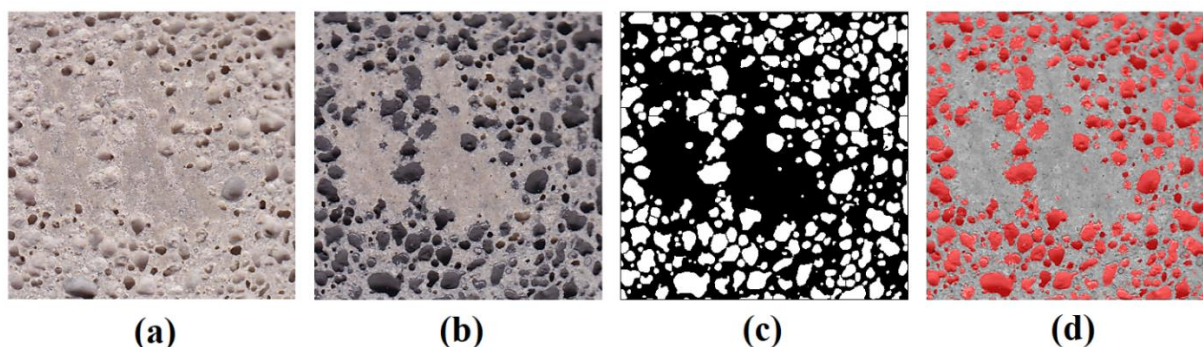


25 pav. Sudėties Nr. 1 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros

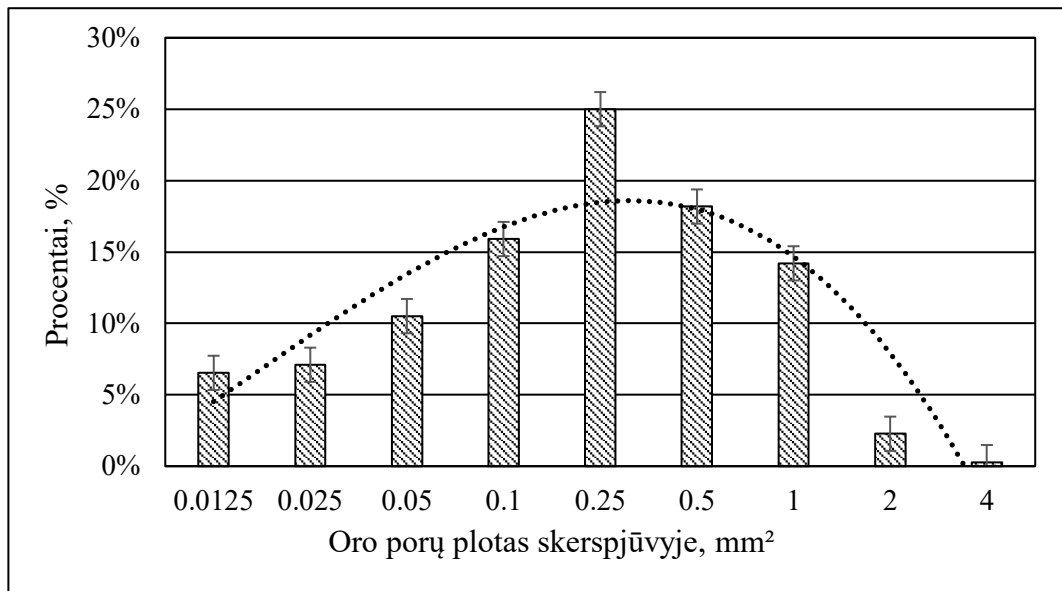


26 pav. Sudėties Nr. 1 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %

Sudėties Nr. 2 bandinio oro porų dydis vyrauja intervale tarp 0,0125–4 mm², iš kurių didžiausią, t. y. 25,0 %, sudaro 0,25 mm² dydžio poros. Sudėties Nr. 2 bandinio nuotraukose (27 pav.) matomas tankus ir tolygus netaisyklingos formos oro porų pasiskirstymas skerspjūvyje. Bandinio viduryje matoma sutankėjimo zona, kurioje poros nesusiformavo. Nustatytas oro porų plotas skerspjūvyje – 35,7 %.

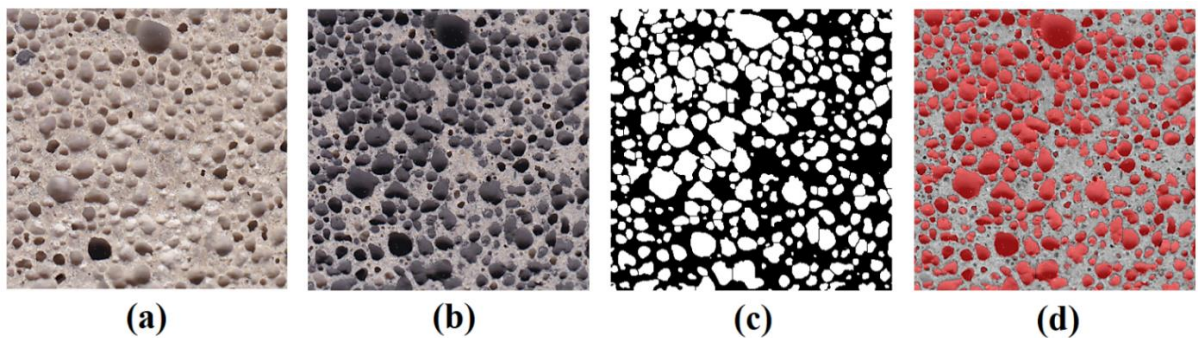


27 pav. Sudėties Nr. 2 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros

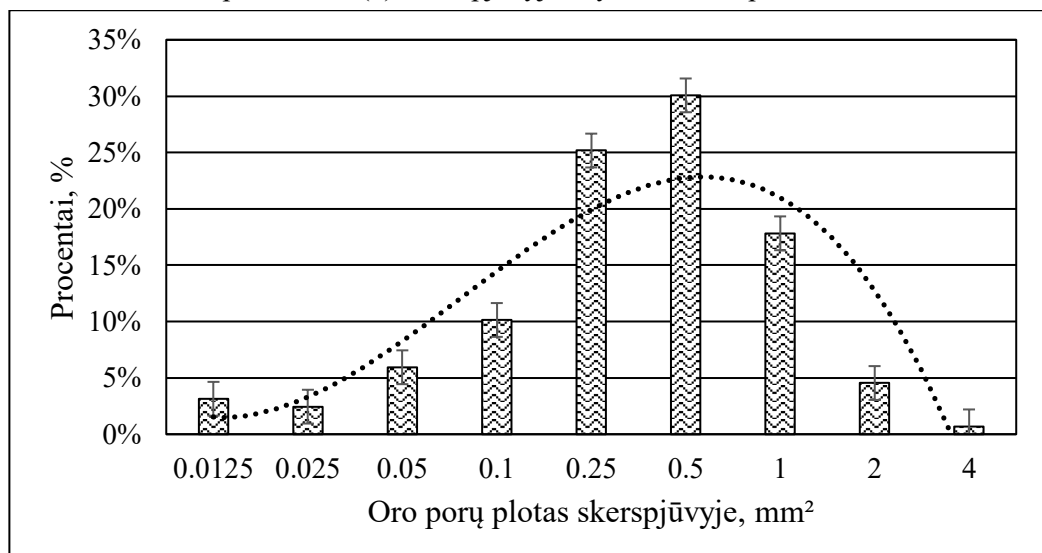


28 pav. Sudėties Nr. 2 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %

Sudėties Nr. 3 bandinio oro porų dydis vyrauja intervale tarp 0,0125–4 mm², iš kurių didžiausią, t. y. 30,1 %, sudaro 0,5 mm² dydžio poros. Sudėties Nr. 3 bandinio nuotraukose (29 pav.) matomas tankus 0,1-1,0 mm² ir pavienių 2-4 mm² netaisyklingos formos oro porų pasiskirstymas skerspjūvyje. Nustatytas oro porų plotas skerspjūvyje – 40,5 %.

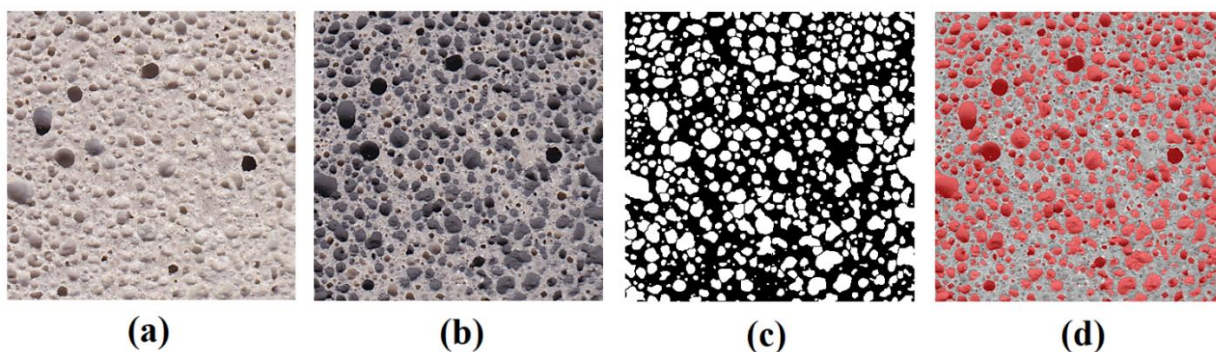


29 pav. Sudėties Nr. 3 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros

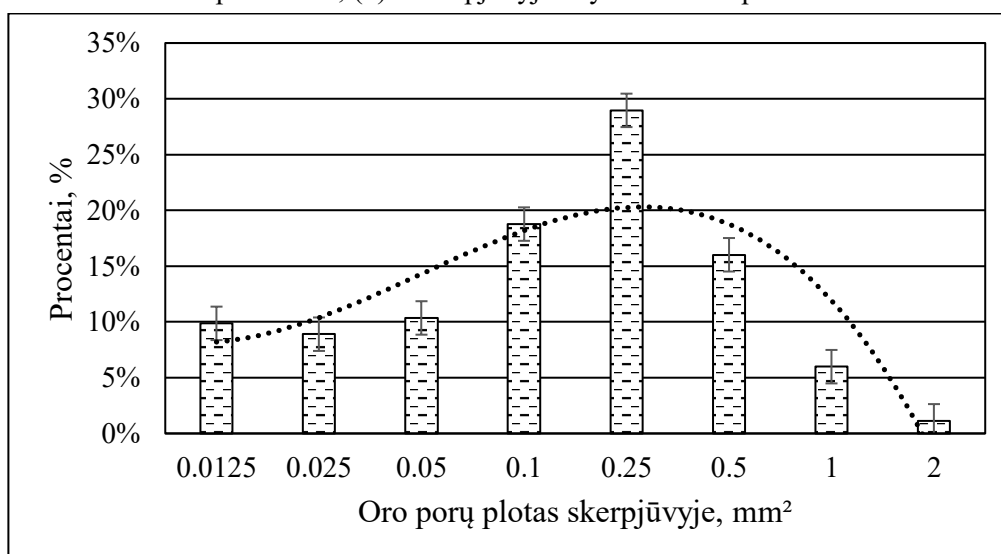


30 pav. Sudėties Nr. 3 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %

Sudėties Nr. 4 bandinio oro porų dydis vyrauja intervale tarp 0,0125–2 mm², iš kurių didžiausią, t. y. 28,9 %, sudaro 0,25 mm² dydžio poros. Sudėties Nr. 4 bandinio nuotraukose (31 pav.) matomas tankus ir tolygus netaisyklingos formos oro porų pasiskirstymas skerspjūvyje. Nustatytas oro porų plotas skerspjūvyje – 42,2 %.

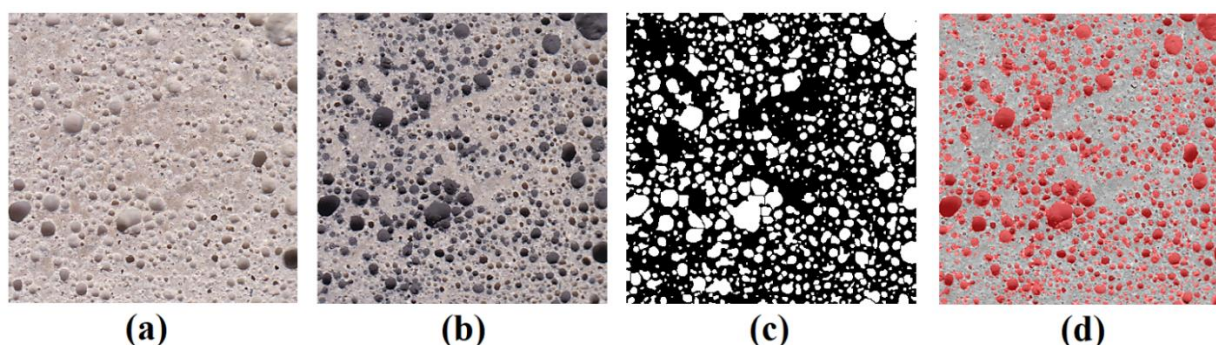


31 pav. Sudėties Nr. 4 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros

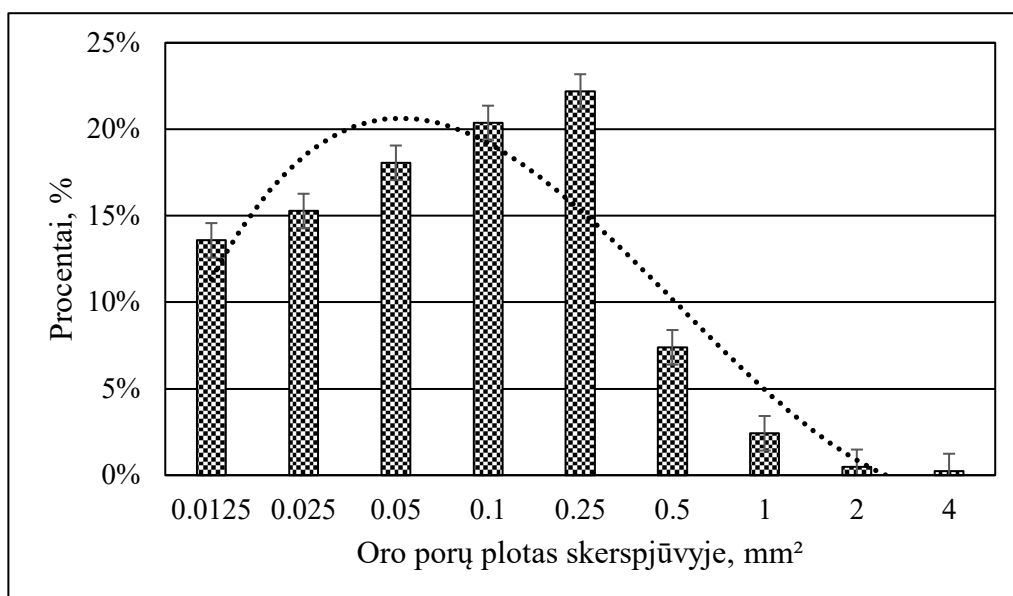


32 pav. Sudėties Nr. 4 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %

Sudėties Nr. 5 bandinio oro porų dydis vyrauja intervale tarp 0,0125–4 mm², iš kurių didžiausią, t. y. 22,2 %, sudaro 0,25 mm² dydžio poros. Sudėties Nr.5 bandinio nuotraukose (33 pav.) matomas tankus ir tolygus smulkių porų 0,0125–0,25 mm² ir pavienių 0,5–4 mm² netaisyklingos formos oro porų pasiskirstymas skerspjūvyje. Nustatytas oro porų plotas skerspjūvyje – 36,2 %.



33 pav. Sudėties Nr. 5 bandinio pjūviai: (a)-originalus skerspjūvis; (b)-nudažytas skerspjūvis; (c)-binarinis paveikslas; (d)- skerspjūvyje išryškintos oro poros



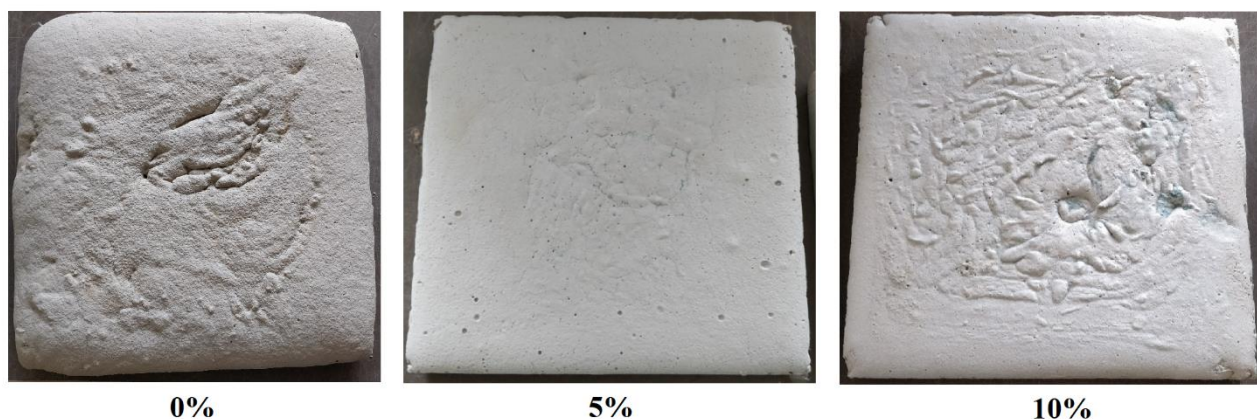
34 pav. Sudėties Nr. 5 bandinio oro porų ploto pasiskirstymas, %

D. Xuan'as ir kt. nustatė šarmu aktyvuotų pelenų medžiagos poringumą skerspjūvyje. Priklausomai nuo aktyvuojamųjų medžiagų santykio, gautos reikšmės vyravo nuo 23,3 % iki 42,2 %. [47]. Baigiamajame darbe nustatytos poringumo reikšmės vyrauja intervale tarp 35,7–47,5 %, kurios yra artimos mokslinėje literatūroje minimoms poringumo reikšmėms. Bandiniai, kuriems nustatytas didesnis poringumas, pasižymėjo didesnėmis oro poromis ir tankesniu jų pasiskirstymu skerspjūvyje.

3.3.4. Šiluminio laidumo savybės

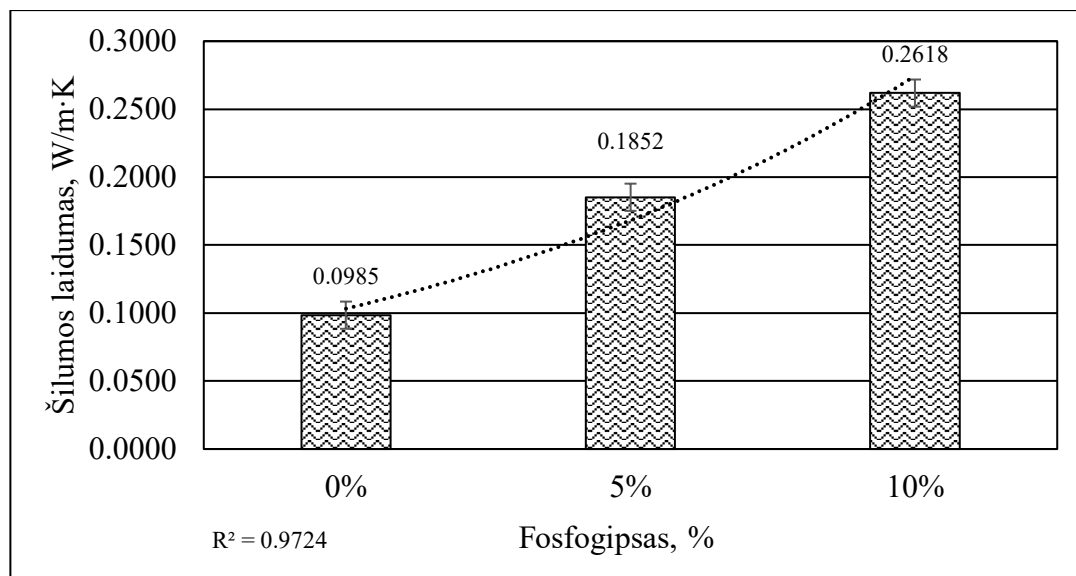
Šiluminis laidumas apibūdina medžiagos savybę perduoti šiluminę energiją tarp kaimyninių molekulių. Tai viena iš svarbiausių izoliacinės medžiagos savybių, kuri įvertinama remiantis LST EN 12667:2002 standarto metodika gauta λ (W/m·K) koeficiento reikšme.

Tiriamąjį darbo metu, buvo nustatyti skirtingų šarmu aktyvuotos medžiagos sudėčių bandinių šiluminio laidumo λ (W/m·K) koeficientai. Pasirinktos medžiagų mišinių sudėtys: Nr. 1, Nr. 3 ir Nr. 5 su skirtingais fosfogipso kiekiais mišinyje, t. y. 0 %, 5 % ir 10 %. Bandinių išoriniai matmenys 300x300x50 mm, parinkti remiantis LST EN 12667:2002 standarto reikalavimais [48].



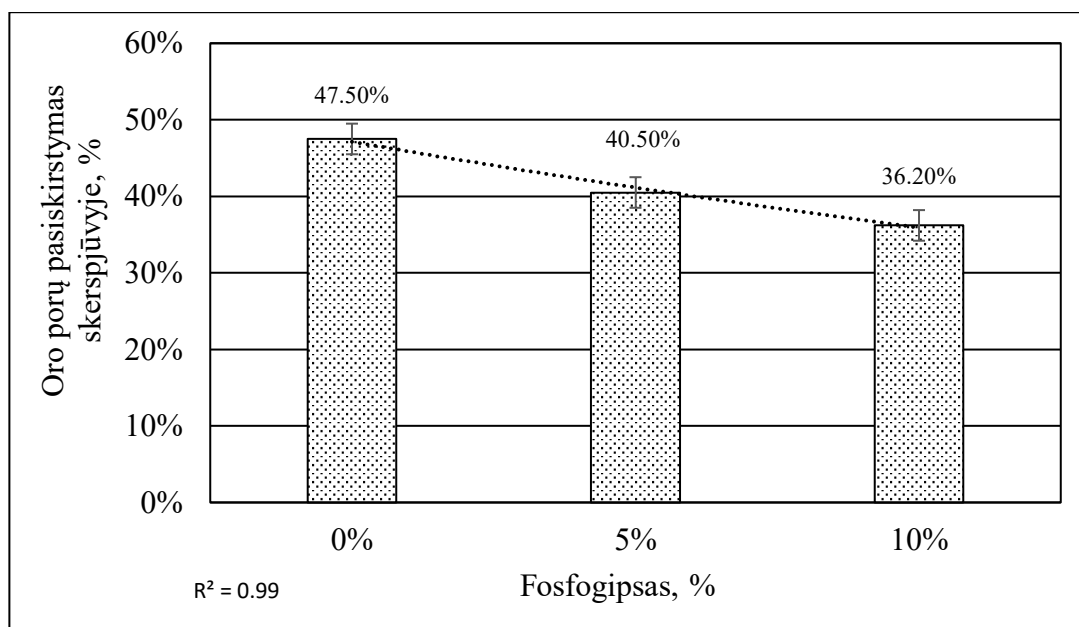
35 pav. Šiluminio laidumo koeficiento nustatymui naudoti bandiniai

Siekiant išvengti drėgmės įtakos tyrimo rezultatams, prieš atliekant šilumos laidumo koeficiento nustatymą, bandiniai buvo išdžiovinti krosnelėje 60 °C temperatūroje 24 h laikotarpiui. Gautos šilumos laidumo koeficiento reikšmės vyravo intervale tarp 0,0985–0,2618 W/m·K. Pastebėta šilumos laidumo didėjimo priklausomybė, didinant fosfogipso kiekį sudėtyje. Porėta šarmu aktyvuota medžiaga, kurios sudėtyje nebuvo naudojamas fosfogipsas, pasižymėjo geriausiomis šiluminio laidumo savybėmis, t. y. $\lambda = 0,0985$ W/m·K. Sudėtyse, kuriose buvo naudojama 5 % ir 10 % fosfogipso, šilumos laidumo koeficientas išaugo atitinkamai 88,1 % ir 165,8 %.



36 pav. Medžiagos šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo fosfogipso kiekio medžiagos mišinyje

Remiantis J. Henon'o, A. Alzina ir kt. tyrimų rezultatais, porėtos šarmu aktyvuotų pelenų medžiagos šiluminis laidumas vyravo nuo 0,12 iki 0,33 W/m·K [25]. Z. Zhang'as, J. L. Provis ir kt. teigia, jog porėtos šarmu aktyvuotų lakiųjų pelenų medžiagos gali pasižymėti šiluminiu laidumu intervale tarp 0,22–0,24 W/m·K [40]. Baigiamajame darbe gautos λ (W/m·K) koeficiento reikšmės vyravo intervale tarp 0,0985–0,2618 W/m·K, kurios yra artimos literatūros šaltiniuose pateiktoms reikšmėms, o sudėtyje su 0 % fosfogipso – mažesnės.



37 pav. Oro porų pasiskirstymas bandiniuose, %

Remiantis bandinių šilumos laidumo ir oro porų pasiskirstymo duomenimis, galima teigti, jog oro porų kiekis tiesiogiai daro įtaką šilumos laidumo koeficientui. Bandiniai, kuriuose nebuvo įmaišytas fosfogipsas, pasižymėjo didžiausiu oro porų dydžiu (0,0125–8 mm²), plotu skerspjūvyje (47,5 %) ir mažiausiu šilumos laidumo koeficientu ($\lambda = 0,0985 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Bandiniai, kuriuose įmaišyta 5 % ir 10 % fosfogipso, pasižymėjo mažesnėmis poromis, plotu skerspjūvyje ir didesniu šilumos laidumo koeficientu. Todėl galima daryti išvadą, jog šilumos laidumo koeficientas λ (W/m·K), tiesiogiai priklauso nuo porų dydžio ir jų pasiskirstymo bandinio skerspjūvyje.

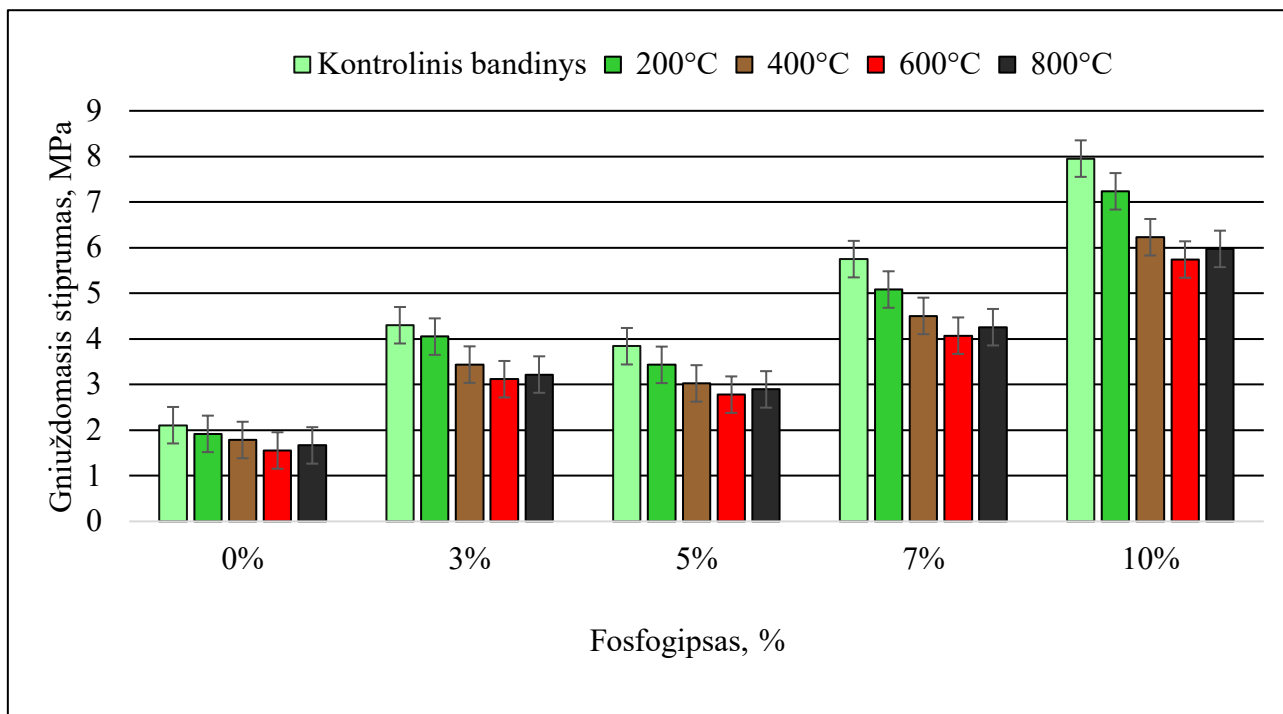
3.3.5. Aukštos temperatūros įtaka bandinių tankio ir gniuždomojo stiprumo savybėms

Mokslinės literatūros šaltiniuose minimas šarmu aktyvuotų aliumosilikatinių medžiagų gebėjimas atlaikyti aukštos temperatūros poveikį. Baigiamajame darbe nustatytas skirtingų sudėčių (6 lentelė) bandinių po 28 parų hidratacijos: tankio ir gniuždomojo stiprumo charakteristikos po 200, 400, 600 ir 800 °C temperatūros poveikio. Kiekvienos sudėties bandiniai buvo kaitinami krosnelėje nurodytose temperatūrose 2 h laikotarpiui. Po temperatūros poveikio buvo išmatuojami bandinių išoriniai matmenys, svoris ir nustatytas tankio pokytis. Taip pat nustatytas jų gniuždomojo stiprumo savybių pokytis lyginant su kontroliniais bandiniais, kurie nebuvo paveikti aukštos temperatūros. Naudotas bandinių dydis – 2x2x2 cm.

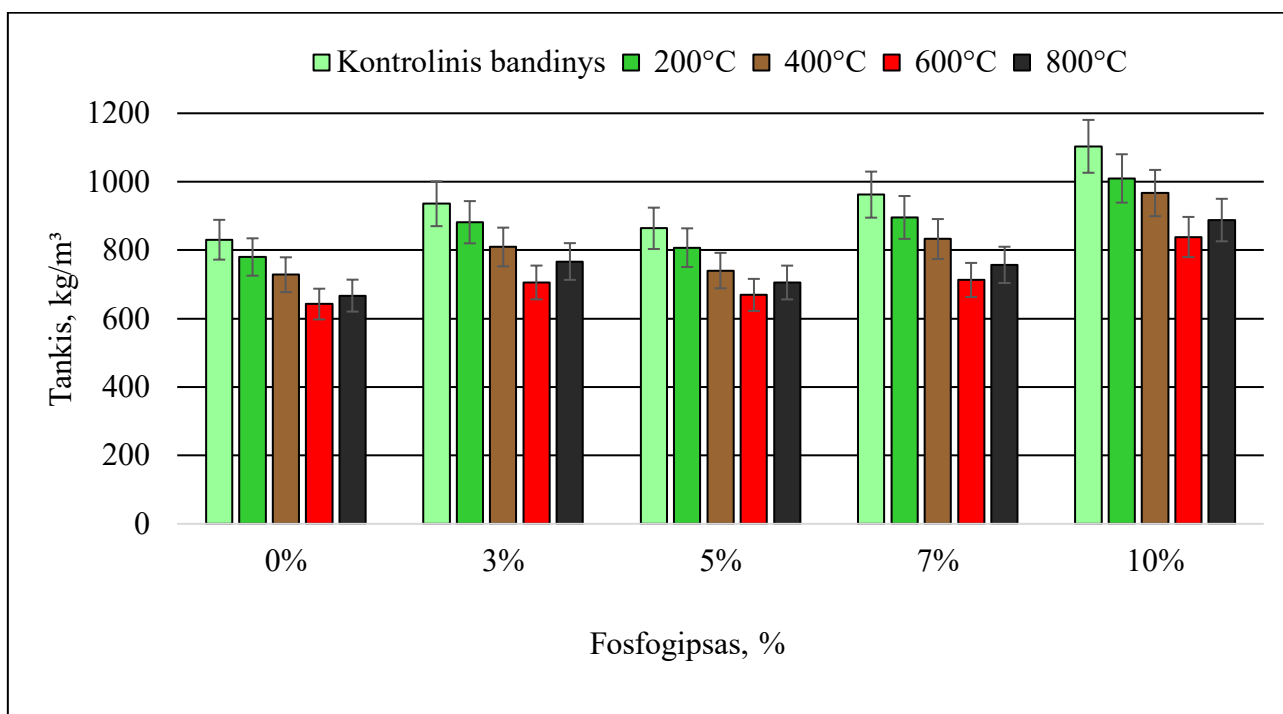


38 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos bandinių kaitinimas krosnelėje „SNOL 1,6.2,5./11-13“

Šarmu aktyvuotos medžiagos bandinius paveikus 200–800 °C temperatūra, buvo nustatytas mechaninių ir fizikinių savybių mažėjimas, kurių pokyčių dydis tiesiogiai priklausė nuo fosfogipso kiekio sudėtyje. Didžiausias gniuždomojo stiprumo praradimas – 27,7 %, nustatytas paveikus bandinius 600 °C temperatūra. Mažiausias gniuždomojo stiprumo praradimas – 9,2 %, nustatytas paveikus bandinius 200 °C temperatūra. Bandinių kaitintų 800 °C temperatūroje gniuždomojo stiprumo sumažėjimas siekia 24,3 %, kuris yra mažesnis nei 600 °C temperatūroje, dėl bandinių struktūros sukepimo ir lydymosi.



39 pav. Gniuždomojo stiprumo priklausomybė nuo fosfogipso kiekio, kaitinant 200–800 °C temperatūrose



40 pav. Tankio priklausomybė nuo fosfogipso kiekio mišinyje, kaitinant 200–800 °C temperatūrose

Nustatytas 2,6 % mažesnis mechaninių savybių praradimas 0 % ir 3 % fosfogipso turinčiuose bandiniuose. Galima teigti, jog porėtos struktūros bandiniai geriau absorbuoja aukštą temperatūrą ir yra pranašesni temperatūros poveikiui, lyginant su 5 %, 7 % ir 10 % fosfogipso turinčiais bandiniais.

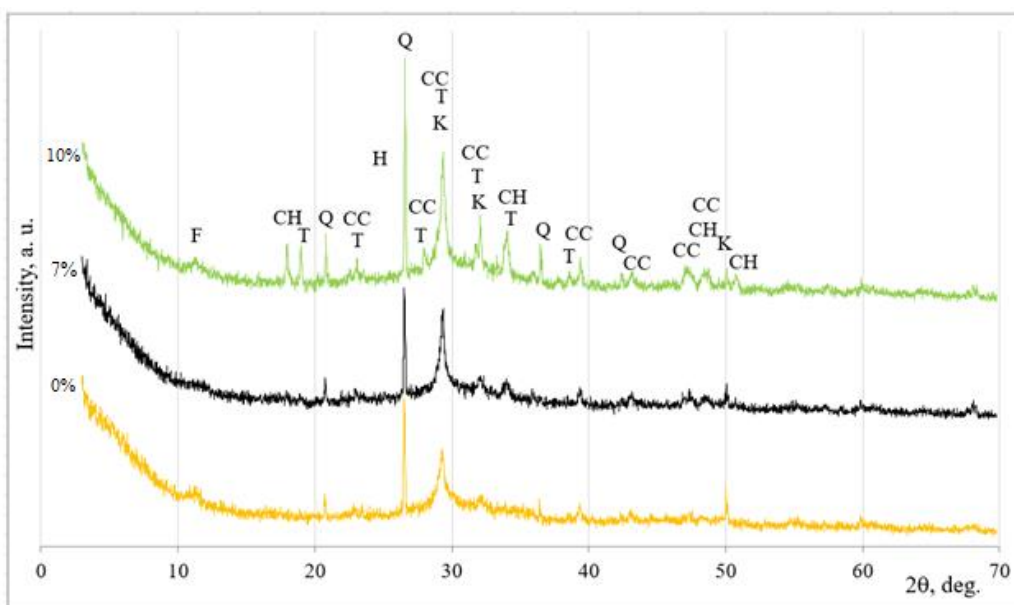
Nustatytos gniuždomojo stiprumo ir tankio vertės koreliuoja, todėl mažėjant tankiui, mažėja ir bandinių gniuždomasis stiprumas. Didžiausias tankio praradimas – 23,9 %, nustatytas paveikus

bandinius 600 °C temperatūra, mažiausias tankio praradimas – 6,8 %, nustatytas paveikus bandinius 200 °C temperatūra.

Remiantis H. Cheng-Young'o ir kt. pateiktais šarmu aktyvuotos medžiagos tyrimų rezultatais, nustatyta, jog porėtą šarmu aktyvuotą medžiagą paveikus 800 °C temperatūra įvyksta struktūros sukepinimas ir lydymasis. Todėl medžiagos mechaninės savybės išauga lyginant su bandiniais po 400 °C ir 600 °C temperatūros poveikio [22]. Magistro baigiamajame darbe taip pat pastebėta minėta mechaninių savybių kitimo tendencija, kuri šarmu aktyvuotą medžiagą sustiprina veikiant 800 °C temperatūrai.

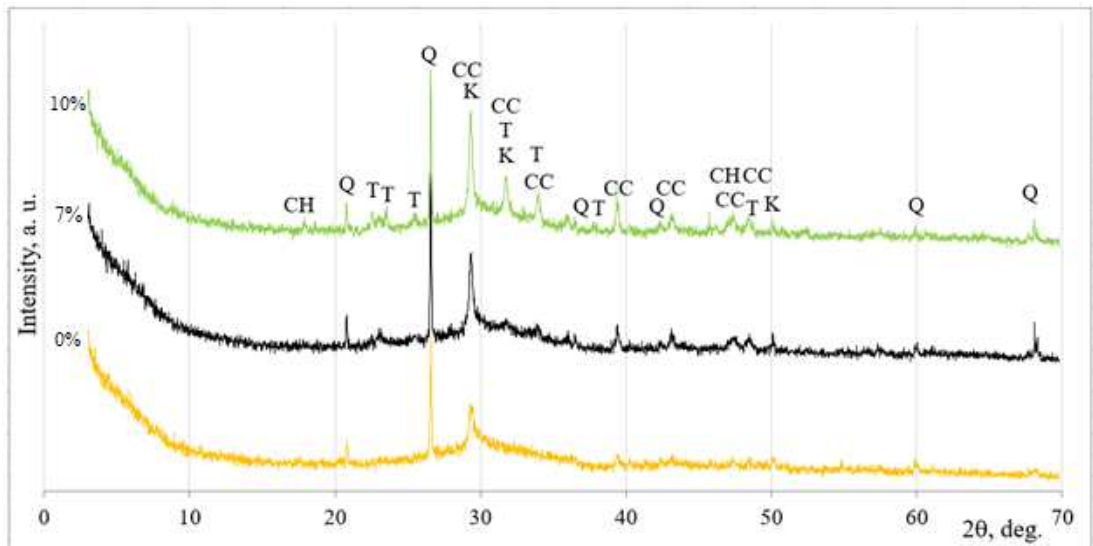
3.3.6. Šarmu aktyvuotos medžiagos mineralinė sudėtis, po aukštos temperatūros poveikio

Atliktos trijų skirtingų sudėčių (6 lentelė), šarmu aktyvuotų porėtos medžiagos bandinių XRD analizės po 28 parų kietėjimo. Nustatyti 200, 400, 600 ir 800 °C temperatūrose vyraujantys mineralinės sudėties pokyčiai, kai į medžiagos sudėtį įmaišyta: 0 %, 7 % ir 10 % fosfogipso. Rentgenogramose vaizduojamų smailių intensyvumas lyginamas su kontrolinių bandinių (23 pav.), žemesnėje temperatūroje paveiktų bandinių ir kitų tyrėjų gautais XRD smailių rezultatais.



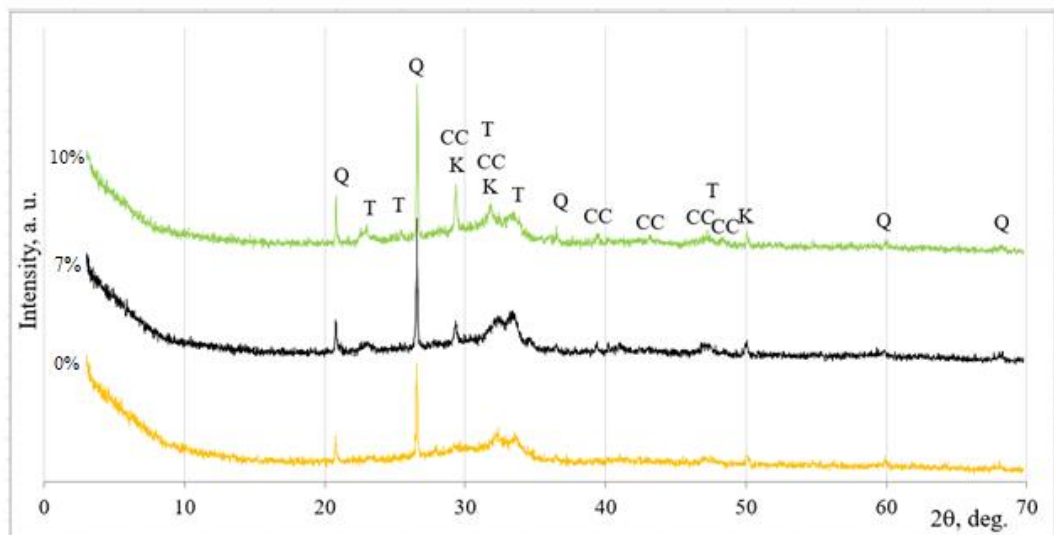
41 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 200 °C temperatūros

Remiantis šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos bandinių, paveiktų 200 °C temperatūros XRD rentgenogramomis, intensyviausios smailės, susijusios su kalcio hidrosilikato ir kvarco mineralais, buvo aptiktos visų pateiktų sudėčių rentgenogramų kreivėse (41 pav.). Šioje temperatūroje kvarco, kalcito, portlandito ir kalcio hidrosilikato mineralai išliko stabilūs, tačiau tenardito ir hidrotalcito smailių intensyvumas sumažėjo, lyginant su kontroliniais bandiniais. Kalcio aliumosilikato hidrato mineralo smailių nenustatyta, todėl galima teigti, jog mineralas skilo paveikus 200 °C temperatūra.



42 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 400 °C temperatūros

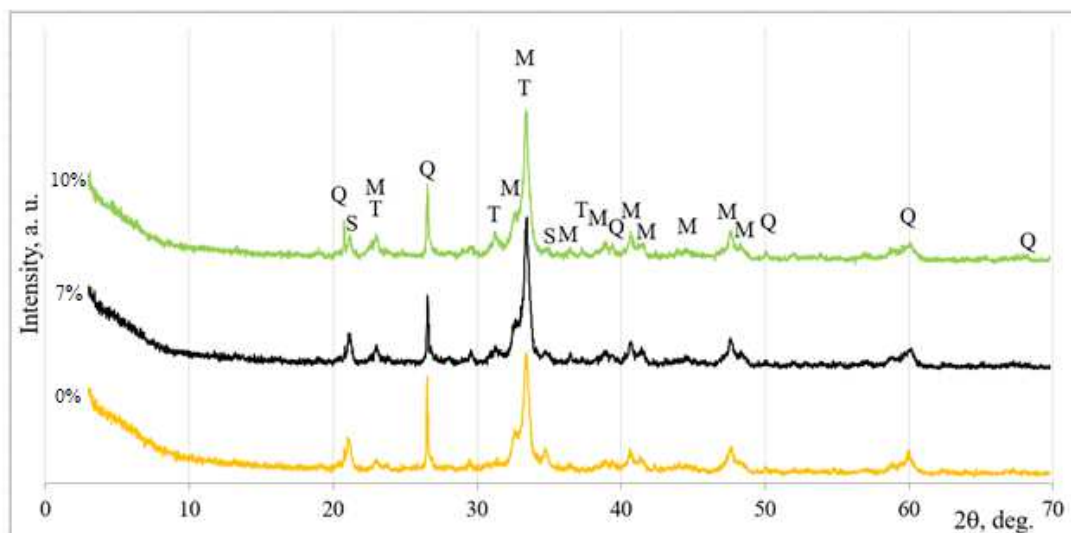
Šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos bandinių, paveiktų 400 °C temperatūros XRD rentgenogramoje (42 pav.), nustatytas hidrotalcito mineralo skilimas bei smailių, susijusių su portlandito ir tenardito mineralais, intensyvumo sumažėjimas, lyginant su smailėmis, kurios buvo nustatytos po bandinių apdorojimo 200 °C temperatūroje. Po 400 °C temperatūros poveikio kvarco, kalcito ir kalcio hidrosilikato mineralus apibūdinančių smailių intensyvumas nepakito, todėl galima teigti, jog šie mineralai išliko stabilūs. Galimai portlandito ir tenardito mineralų smailių intensyvumo mažėjimas turėjo įtakos gniuždomojo stiprumo verčių sumažėjimui.



43 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 600 °C temperatūros

Remiantis šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos bandinių, paveiktų 600 °C temperatūros XRD rentgenograma (43 pav.), galima teigti, jog kvarco, kalcito ir tenardito mineralai išliko stabilūs. Pastebėtas kalcio hidrosilikato smailių intensyvumo sumažėjimas, o portlandito mineralų smailės nenustatytos, todėl galima teigti, jog portlandito mineralo skilimas turėjo įtakos bandinių gniuždomajam stiprumui. A. M. Rashad'as ir kt. taip pat nustatė portlandito mineralo skilimą 500 °C temperatūroje, o tai turėjo įtakos kalcio oksido (CaO) susiformavimui ir vandens (H₂O) išgaravimui [49].

Portlandito skilimą po 600 °C temperatūros poveikio pagrindžianti (2) formulė:



44 pav. Šarmu aktyvuotos medžiagos XRD rentgenogramos, po 800 °C temperatūros

Šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos bandinių, paveiktų 800 °C temperatūros XRD rentgenogramoje (44 pav.), nustatyti ženklūs mineralinės sudėties pokyčiai. Kvarco ir tenardito smailių intensyvumas sumažėjo, bet mineralai neskilo. Kalcio hidrosilikato ir kalcito mineralams būdingų smailių nebuvo nustatyta, todėl galima teigti, jog šie mineralai skilo paveikti 800 °C temperatūros. Susiformavo nauji mineralai: mervinitas ir natrio aliumosilikatas. D. Vaičiukynienei ir kt. taip pat pavyko šarmu aktyvuoto šlako bandiniuose, po 800 °C temperatūros, nustatyti susiformavusį mervinito mineralą [5]. A. M. Rashad'as ir kt. nustatė kalcito skilimą 740 °C temperatūroje [49]. Galima teigti, jog kitų tyrėjų gauti XRD rentgenogramų rezultatai yra artimi baigiamajame darbe gautiems rezultatams.

9 lentelė. XRD rentgenogramose vyraujančių mineralų suvestinė, po aukštų temperatūrų poveikio

Eil. Nr.	Vyraujančių mineralų žymėjimas	Identifikacinis numeris	Junginio formulė	Junginio pavadinimas	Temperatūra, kurioje vyrauja mineralas, °C
1	Q	83-539	SiO ₂	Kvarcas	200, 400, 600, 800
2	CC	72-1937	CaCO ₃	Kalcitas	200, 400, 600
3	T	74-2036	Na ₂ SO ₄	Tenarditas	200, 400, 600, 800
4	K	33-306	Ca _{1,5} SiO _{3,5} H ₂ O	Kalcio hidrosilikatas (C-S-H)	200, 400, 600
5	CH	84-1268	Ca(OH) ₂	Portlanditas	200, 400
6	F	14-191	Mg ₆ Al ₂ CO ₃ (OH) ₁₆ ·4H ₂ O	Hidrotalcitas	200
7	M	35-591	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	Mervinitas	800
8	S	76-2385	Na ₆ Al ₄ Si ₄ O ₁₇	Natrio aliumosilikatas	800

Bandiniai paveikti 200-800 °C temperatūros pasižymėjo aukštu terminiu atsparumu ir mažu mechaninių savybių pokyčiu dėl palankiai susiformavusios medžiagų mineralinės sudėties. Aukštose temperatūrose vyraujančių tenardito, kalcito, portlandito ir C-S-H, mineralų stabilumas bei naujų mineralų susiformavimas tiesiogiai koreliavo su gniuždomojo stiprumo vertėmis.

Išvados

1. Šarmu aktyvuotos medžiagos (rišikliai) yra vienos iš sparčiausiai įsitvirtinančių alternatyvų galinčios pakeisti įprastą portlandcementį dėl pramonės atliekų panaudojimo ir 55–75 % mažesnės CO₂ emisijos gamybos metu.
2. Metalurginio šlako žaliavos sudėtyje nustatyti vyraujantys kalcio karbonato, kvarco ir hidrotalcito mineralai, taip pat CaO (45,20 %), SiO₂ (37,10 %) ir Al₂O₃ (6,44 %) cheminiai elementai. Fosfogipso žaliavos sudėtyje nustatyti vyraujantys basanito ir brušito mineralai, taip pat SO₃ (52,71 %), CaO (39,06 %) ir SiO₂ (0,34 %) cheminiai elementai. Remiantis granulimetrinės analizės rezultatais, 90 % šlako sudaro 202,89 μm dydžio dalelės, o 90 % fosfogipso sudaro 19,98 μm dydžio dalelės. Šlako ir fosfogipso medžiagų dalelių diametras skiriasi 10 kartų, tačiau savitojo paviršiaus analizės rezultatai artimi, t. y. atitinkamai 207 ir 201 m²/kg.
3. Šarmu aktyvuoto šlako porėta medžiaga po 3 parų kietėjimo pasižymėjo aukštomis ankstyvojo gniuždomojo stiprumo savybėmis, kadangi įgavo 64–88 % galutinio stiprumo. Šarmu aktyvuoto šlako porėtos medžiagos bandiniai po 28 parų kietėjimo, su 3 % fosfogipso sudėtyje, pasižymėjo 103,9 % gniuždomojo stiprumo ir 12,7 % tankio padidėjimu, lyginant su kontroliniu bandiniu. Nustatyta tiesioginė šarmu aktyvuotos medžiagos tankio ir gniuždomojo stiprumo priklausomybė, kai į sudėtį įmaišoma 3–10 % fosfogipso.
4. Porėtos šarmu aktyvuotos medžiagos poringumo skerspjūvyje reikšmės vyravo intervale tarp 35,7–47,5 %. Bandiniai, kurių sudėtyje buvo įmaišyta 5 % fosfogipso pasižymėjo 14,7 % mažesniu poringumu, o bandiniai su 10 % fosfogipso – 23,8 % mažesniu poringumu, lyginant su kontroliniu bandiniu be fosfogipso.
5. Šarmu aktyvuoto šlako porėtai medžiagai nustatytas $\lambda = 0,0985$ W/m·K šiluminis laidumas, o į medžiagos sudėtį įmaišius 5 % fosfogipso šilumos laidumas išaugo 88,1 % ($\lambda = 0,1852$ (W/m·K)), įmaišius 10 % fosfogipso šilumos laidumas išaugo 165,8 % ($\lambda = 0,2618$ (W/m·K)). Galima teigti, jog fosfogipsas neigiamai veikia šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos šiluminio laidumo savybes. Šilumos laidumo koeficientas λ (W/m·K), tiesiogiai priklauso nuo porų dydžio ir jų pasiskirstymo bandinio skerspjūvyje.
6. Šarmu aktyvuotos medžiagos bandinius paveikus 200–800 °C temperatūra, nustatytas gniuždomojo stiprumo sumažėjimas vyraujantis 9,2–27,7 %. Pastebėtas 2,6 % mažesnis mechaninių savybių kitimas 0 % ir 3 % fosfogipso turinčiuose bandiniuose, lyginant su 5 %, 7 % ir 10 % fosfogipso turinčiais bandiniais. Galima teigti, jog porėtos struktūros bandiniai geriau absorbuoja aukštą temperatūrą ir yra pranašesni temperatūros poveikiui.
7. **Rekomenduojamas fosfogipso kiekis, šarmu aktyvuotos medžiagos sudėtyje yra 3–5 %, dėl optimalaus mechaninių, šilumos laidumo ir atsparumo aukštai temperatūrai savybių pasiskirstymo. Šarmu aktyvuota šlako ir fosfogipso medžiaga gali būti pritaikoma pertvarinių blokelių gamyboje ir konstrukcijų apsaugai nuo aukštos temperatūros poveikio.**

Literatūros sąrašas

1. TEMUJIN, J., et al. *Fundamentals of Geopolymers and Related Alkali Activated Materials [interaktyvus]*. Trans Tech Publ, 2014, 2015 [žiūrėta 2020-05-04]. DOI www.scientific.net/MSF.803.144.
2. YANG, K., SONG, J. and SONG, K. Assessment of CO₂ Reduction of Alkali-Activated Concrete. *Journal of Cleaner Production [interaktyvus]*., 2013, vol. 39 [žiūrėta 2020-05-02]. pp. 265-272. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.001>.
3. BIGNOZZI, M.C., et al. Room Temperature Alkali Activation of Fly Ash: The Effect of Na₂O/SiO₂ Ratio. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*., 2014, vol. 69 [žiūrėta 2019-10-11]. pp. 262-270. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.062>.
4. NIZEVIČIENĖ, D., et al. *The Influence of Milling for Phosphogypsum and Zeolite System [interaktyvus]*. International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management, 2016 [žiūrėta 2020-08-10]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/309135902>.
5. VAIČIUKYNIENĖ, D., et al. Effect of Phosphogypsum on the Stability upon Firing Treatment of Alkali-Activated Slag. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*., 2018, vol. 184 [žiūrėta 2020-07-15]. pp. 485-491. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.213>.
6. PALOMO, A. and FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. *Alkaline Activation, Procedure for Transforming Fly Ash into New Materials. Part I: Applications [interaktyvus]*. World of Coal Ash (WOCA) Conference, 2011 [žiūrėta 2019-10-09]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/303160905>.
7. RAJAMMA, R., LABRINCHA, J.A. and FERREIRA, V.M. Alkali Activation of Biomass Fly Ash–metakaolin Blends. *Fuel [interaktyvus]*., 2012, vol. 98 [žiūrėta 2019-10-11]. pp. 265-271. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.006>.
8. NAJIMI, M., GHAFORI, N. and SHARBAF, M. Alkali-Activated Natural Pozzolan/Slag Mortars: A Parametric Study. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*., 2018, vol. 164 [žiūrėta 2020-02-22]. pp. 625-643. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.222>.
9. NETO, A.A.M., CINCOTTO, M.A. and REPETTE, W. Drying and Autogenous Shrinkage of Pastes and Mortars with Activated Slag Cement. *Cement and Concrete Research [interaktyvus]*., 2008, vol. 38, no. 4 [žiūrėta 2020-02-22]. pp. 565-574. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.002>.
10. GU, Y., et al. Properties and Microstructure of Alkali-Activated Slag Cement Cured at Below- and about-Normal Temperature. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*., 2015, vol. 79 [žiūrėta 2020-02-22]. pp. 1-8. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.068>.
11. GAO, X., YU, Q.L. and BROUWERS, H. Assessing the Porosity and Shrinkage of Alkali Activated Slag-Fly Ash Composites Designed Applying a Packing Model. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*., 2016, vol. 119 [žiūrėta 2020-02-22]. pp. 175-184. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.026>.
12. PACHECO-TORGAL, F., CASTRO-GOMES, J. and JALALI, S. Alkali-Activated Binders: A Review: Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration

- Products. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*., 2008, vol. 22, no. 7 [žiūrėta 2019-12-27]. pp. 1305-1314. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>.
13. PUERTAS, F., et al. A Model for the CASH Gel Formed in Alkali-Activated Slag Cements. *Journal of the European Ceramic Society [interaktyvus]*., 2011, vol. 31, no. 12 [žiūrėta 2020-02-29]. pp. 2043-2056. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036>.
14. ARGIZ, C., MENÉNDEZ, E., MORAGUES, A. and SANJUÁN, M.A. Fly Ash Characteristics of Spanish Coal-Fired Power Plants. *Afinidad [interaktyvus]*., 2015, vol. 72, no. 572 [žiūrėta 2020-02-23]. pp. 2-8. Prieiga per: <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/305569>.
15. PROVIS, J.L. and Van Deventer, Jan Stephanus Jakob. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications [interaktyvus]*. Australia: Elsevier, 2009[žiūrėta 2020-02-29]. ISBN 978-1-84569-449-4. Prieiga per: https://www.academia.edu/34232666/Geopolymers_Structures_Processing_Properties_and_Industrial_Applications.
16. LI, C., SUN, H. and LI, L. A Review: The Comparison between Alkali-Activated Slag (Si Ca) and Metakaolin (Si Al) Cements. *Cement and Concrete Research [interaktyvus]*., 2010, vol. 40, no. 9 [žiūrėta 2020-02-29]. pp. 1341-1349. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>.
17. BERNAL, S.A., et al. Effect of Binder Content on the Performance of Alkali-Activated Slag Concretes. *Cement and Concrete Research [interaktyvus]*., 2011, vol. 41, no. 1 [žiūrėta 2020-03-09]. pp. 1-8. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.017>.
18. SHI, C., ROY, D. and KRIVENKO, P. *Alkali-Activated Cements and Concretes [interaktyvus]*. London: CRC press, 2003[žiūrėta 2020-03-09]. ISBN 9780429180712. Prieiga per: <https://doi.org/10.1201/9781482266900>.
19. RASHAD, A.M. Alkali-Activated Metakaolin: A Short Guide for Civil Engineer—An Overview. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*., 2013, vol. 41 [žiūrėta 2020-02-28]. pp. 751-765. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.030>.
20. RASHAD, A.M. Metakaolin as Cementitious Material: History, Scours, Production and composition—A Comprehensive Overview. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*., 2013, vol. 41 [žiūrėta 2020-02-28]. pp. 303-318. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>.
21. PROVIS, J.L., PALOMO, A. and SHI, C. Advances in Understanding Alkali-Activated Materials. *Cement and Concrete Research [interaktyvus]*., 2015, vol. 78 [žiūrėta 2020-03-08]. pp. 110-125. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>.
22. CHENG-YONG, H., YUN-MING, L., Abdullah, Mohd Mustafa Al Bakri and HUSSIN, K. Thermal Resistance Variations of Fly Ash Geopolymers: Foaming Responses. *Scientific Reports [interaktyvus]*., 2017, vol. 7, no. 1 [žiūrėta 2019-11-24]. pp. 1-11. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/srep45355>.
23. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A., PASTOR, J.Y. and MARTIN, A. New Cementitious Materials Based on Alkali-activated Fly Ash: Performance at High Temperatures. *Journal of the American Ceramic Society [interaktyvus]*., 2008, vol. 91, no. 10 [žiūrėta 2019-10-14]. pp. 3308-3314. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02625.x>.

24. CARABBA, L., et al. High-Temperature Behaviour of Alkali-Activated Composites Based on Fly Ash and Recycled Refractory Particles. *J Ceram Sci Technol [interaktyvus].*, 2017, vol. 8 [žiūrėta 2019-10-17]. pp. 377-388. Prieiga per: www.doi.org/10.4416/JCST2017-00047.
25. HENON, J., et al. Potassium Geopolymer Foams made with Silica Fume Pore Forming Agent for Thermal Insulation. *Journal of Porous Materials [interaktyvus].*, 2013, vol. 20, no. 1 [žiūrėta 2020-02-29]. pp. 37-46. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10934-012-9572-3>.
26. RICKARD, W.D., TEMUJIN, J. and VAN RIESSSEN, A. Thermal Analysis of Geopolymer Pastes Synthesised from Five Fly Ashes of Variable Composition. *Journal of Non-Crystalline Solids [interaktyvus].*, 2012, vol. 358, no. 15 [žiūrėta 2019-11-24]. pp. 1830-1839. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.05.032>.
27. CLYNE, T.W., GOLOSNOY, I.O., TAN, J.C. and MARKAKI, A.E. Porous Materials for Thermal Management Under Extreme Conditions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences [interaktyvus].*, 2006, vol. 364, no. 1838 [žiūrėta 2019-11-24]. pp. 125-146. Prieiga per: www.doi.org/10.1098/rsta.2005.1682.
28. HLAVÁČEK, P., et al. Inorganic Foams made from Alkali-Activated Fly Ash: Mechanical, Chemical and Physical Properties. *Journal of the European Ceramic Society [Interaktyvus] [interaktyvus].*, 2015, vol. 35, no. 2 [žiūrėta 2019-11-24]. pp. 703-709. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.08.024>.
29. BAJARE, D., VITOLA, L., DEMBOVSKA, L. and BUMANIS, G. Waste Stream Porous Alkali Activated Materials for High Temperature Application. *Innovation in Cements for Sustainability [interaktyvus].*, 2020 [žiūrėta 2020-06-25]. pp. 1-13. Prieiga per: <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00092>.
30. CRIADO, M., PALOMO, A. and FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali Activation of Fly Ashes. Part I: Effect of Curing Conditions on the Carbonation of the Reaction Products. *Fuel [interaktyvus].*, 2005, vol. 84, no. 16 [žiūrėta 2019-10-20]. pp. 2048-2054. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030>.
31. CRIADO, M., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. and PALOMO, A. Alkali Activation of Fly Ash. Part III: Effect of Curing Conditions on Reaction and its Graphical Description. *Fuel [interaktyvus].*, 2010, vol. 89, no. 11 [žiūrėta 2019-10-20]. pp. 3185-3192. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.051>.
32. JANKAUSKAS, V. *Geopolimerinių Betonų Kūrimas Ir Jų Fizinių Savybių Tyrimas: Magistro Darbas [interaktyvus]*. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. Prieiga per eLABa – nacionalinė Lietuvos akademinė elektroninė biblioteka, 2016[žiūrėta 2020-02-23].Prieiga per: <http://talpykla.elaba.lt>.
33. FENG, J., et al. Development of Porous Fly Ash-Based Geopolymer with Low Thermal Conductivity. *Materials & Design (1980-2015) [interaktyvus].*, 2015, vol. 65 [žiūrėta 2020-03-16]. pp. 529-533. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.024>.
34. MA, Y., HU, J. and YE, G. The Effect of Activating Solution on the Mechanical Strength, Reaction Rate, Mineralogy, and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash. *Journal of Materials Science [interaktyvus].*, 2012, vol. 47, no. 11 [žiūrėta 2020-02-29]. pp. 4568-4578. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6316-3>.

35. COLLINS, F. and SANJAYAN, J.G. Effect of Pore Size Distribution on Drying Shrinking of Alkali-Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Research [interaktyvus]*, 2000, vol. 30, no. 9 [žiūrėta 2020-02-22]. pp. 1401-1406. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00327-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00327-6).
36. GIRSKAS, G. *Sintetiniu Ceolitu Modifikuoto Cementbetonio Atsparumas Šalčiui [interaktyvus]*. VGTU leidykla „Technika“, 2015 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: <http://dspace.vgtu.lt/handle/1/1829>.
37. HLAVAČEK, P. *Engineering Properties of Alkali Activated Composites [interaktyvus]*. PhD thesis, CTU in Prague, FCE, Department of Mechanics, 2014 [žiūrėta 2019-11-08]. Prieiga per: http://mech.fsv.cvut.cz/wiki/images/e/eb/PhD_thesis_Petr_Hlavacek_2014.pdf.
38. HAJIMOHAMMADI, A., et al. Alkali Activated Slag Foams: The Effect of the Alkali Reaction on Foam Characteristics. *Journal of Cleaner Production [interaktyvus]*, 2017, vol. 147 [žiūrėta 2019-11-24]. pp. 330-339. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.134>.
39. DUCMAN, V. and KORAT, L. Characterization of Geopolymer Fly-Ash Based Foams obtained with the Addition of Al Powder Or H2O2 as Foaming Agents. *Materials Characterization [interaktyvus]*, 2016, vol. 113 [žiūrėta 2020-05-06]. pp. 207-213. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.01.019>.
40. ZHANG, Z., PROVIS, J.L., REID, A. and WANG, H. Geopolymer Foam Concrete: An Emerging Material for Sustainable Construction. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*, 2014, vol. 56 [žiūrėta 2020-03-08]. pp. 113-127. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081>.
41. PROVIS, J.L. and BERNAL, S.A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research [interaktyvus]*, 2014, vol. 44 [žiūrėta 2020-03-09]. pp. 299-327. Prieiga per: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>.
42. DE WEERDT, K. Geopolymers - State of the Art. *Low-Carbonfootprint Binder Systems [interaktyvus]*, 2011 [žiūrėta 2020-01-28]. pp. 2-16 ISSN 1891-1978. . Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
43. BLIGH, R. and GLASBY, T. *Development of Geopolymer Precast Floor Panels for the Global Change Institute at University of Queensland [interaktyvus]*. Concrete 2013 Conference, 2013 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: <https://blightanner.com.au>.
44. NOVAIS, R.M., PULLAR, R.C. and LABRINCHA, J.A. Geopolymer Foams: An Overview of Recent Advancements. *Progress in Materials Science [interaktyvus]*, 2020, vol. 109. pp. 100621. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100621>.
45. VAIČIUKYNIENĖ, D. and SASNAUSKAS, V. *Statybinės Medžiagotyros Laboratoriniai Darbai (Elektroninis Išteklius): Mokomoji Knyga [interaktyvus]*. 1-a laida. ed. Kaunas: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla i.e. Technologija, 2011[žiūrėta 2020-05-15]. ISBN 9786090205372. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt>.
46. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS [LST EN 1008:2005]. *Vanduo Betonui. Techniniai Vandens Ėminių Ėmimo, Bandymo Ir Tinkamumo Reikalavimai, Įskaitant Gražinamą Iš Gamybos Betono Pramonėje Vandeni, Pakartotinai Naudojamą Betono Mišiniui Ruošti [interaktyvus]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003.

47. XUAN, D., TANG, P. and POON, C.S. MSWIBA-Based Cellular Alkali-Activated Concrete Incorporating Waste Glass Powder. *Cement and Concrete Composites [interaktyvus]*., 2019, vol. 95 [žiūrėta 2020-11-01]. pp. 128-136 ISSN 0958-9465. . Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.018>.

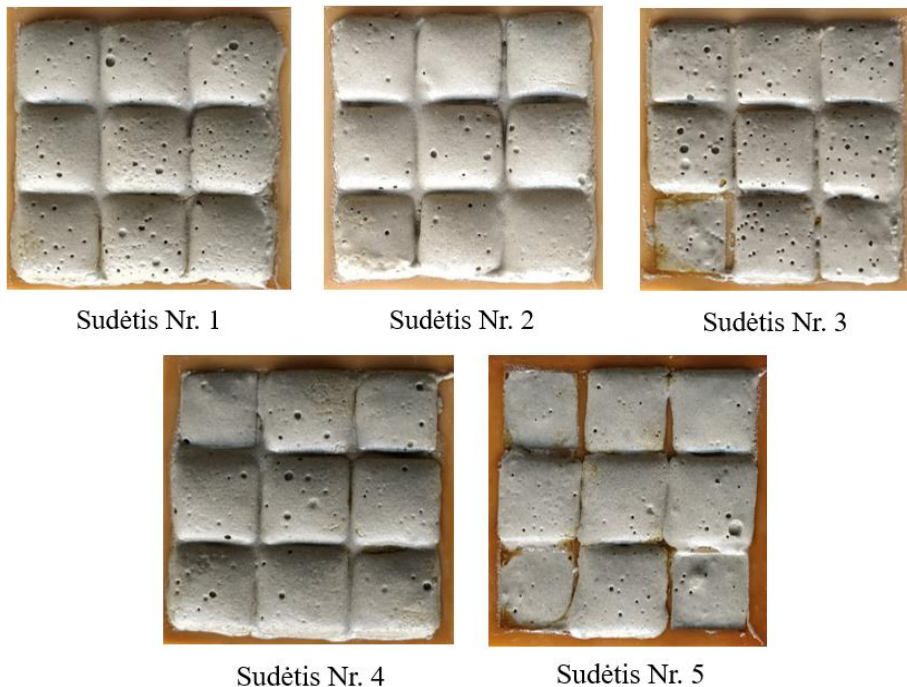
48. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12667:2002]. *Šiluminės Statybinių Medžiagų Ir Gaminų Savybės. Šiluminės Varžos Nustatymas Apsaugotos Karštosios Plokštės Ir Šilumos Srauto Matuoklio Metodais. Didelės Ir Vidutinės Šiluminės Varžos Gaminiai [interaktyvus]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.

49. RASHAD, A.M., et al. Chemical and Mechanical Stability of Sodium Sulfate Activated Slag After Exposure to Elevated Temperature. *Cement and Concrete Research [interaktyvus]*., 2012, vol. 42, no. 2 [žiūrėta 2020-11-30]. pp. 333-343 ISSN 0008-8846. . Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.10.007>.

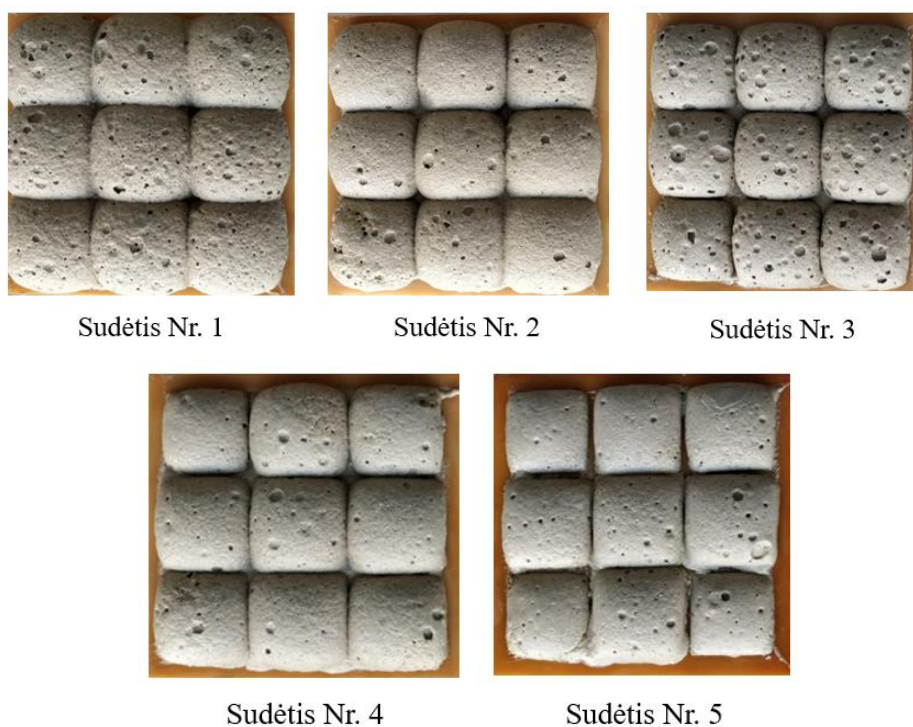
Priedai

1 priedas. Šarmu aktyvuotos medžiagos bandinių išsipūtimas

Šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos bandinių paviršiuje vyraujančias ertmes suformuoja į aplinką išsiskiriantis deguonis, kuris atsakingas už porėtos medžiagos struktūros suformavimą. Pateiktos nuotraukos vaizduoja medžiagos išsipūtimo intensyvumą, kuris kinta nuo šviežiai į formas suklotų mišinių (45 pav.), iki 15 min po mišinių suklojimo į bandinių formas (46 pav.).



45 pav. Šviežiai suformuoti skirtingų sudėčių šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos bandiniai



46 pav. Skirtingų sudėčių šarmu aktyvuotos porėtos medžiagos bandiniai, po suformavimo praėjus 15min