



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

**Stiklo duženų, išskirtų iš komunalinių atliekų srauto,  
panaudojimas gaminant statybos produktus**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Paulius Ramšas**

Projekto autorius

**dr. prof. Vitoldas Vaitkevičius**

Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Stiklo duženų, išskirtų iš komunalinių atliekų srauto, panaudojimas gaminant statybos produktus**

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6211EX008)

---

**Paulius Ramšas**

Projekto autorius

**prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius**

Vadovas

**doc. dr. Ernestas Ivanauskas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Paulius Ramšas

## **Stiklo duženų, išskirtų iš komunalinių atliekų srauto, panaudojimas gaminant statybos produktus**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Pauliaus Ramšo, baigiamasis projektas tema „Stiklo duženų, išskirtų iš komunalinių atliekų srauto, panaudojimas gaminant statybos produktus“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)



Ramšas Paulius. Stiklo duženų, išskirtų iš komunalinių atliekų srauto, panaudojimas gaminant statybos produktus. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Statybos inžinerija (H200), Technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: stiklo duženos, maltas stiklas, betonas, pucolanai.

Kaunas, 2021. 57 p.

### **Santrauka**

Gerai žinomas faktas, kad portlandcemenčio gamyba yra ekologiškai brangus procesas, kuris yra atsakingas už 5-9 % antropogeninės (žmogaus sukulto) globalinės anglies dioksido emisijos. Kad sumažintų poveikį gamtai, susijusį su portlandcemenčio gamyba, t. y. betonu, pramonės sektorius pritaiko alternatyvas mažinančias kainas ir aplinkai daromą žalą. Stiklo atliekos buvo ištirtos kaip galimas papildas cementui.

Norint nustatyti optimalų / racionalų malto stiklo kiekį vibropresuojamuose gaminiuose reikia nustatyti, kokią įtaką gniuždymo stipriui turi skirtingo malto stiklo kiekis bandymuose. Kadangi betonas su 30 % maltu stiklu parodė didesnę gniuždymo stiprį, nei betonas be malto stiklo, reikia atlikti papildomus bandymus pakeičiant portlandcementį į maltą stiklą, o ne užpildą. Atlikus gniuždymo tyrimą su švaraus malto stiklo ir organinėmis medžiagomis užterštu malto stiklo turinčiais bandiniais, paaiškėjo, kad užterštas maltas stiklas suteikia panašias savybes kaip ir švarus maltas stiklas, todėl nėra būtina papildomai valyti stiklo.

Nustatant skirtingą malto stiklo kiekį turinčio betono atsparumą šalčiui paaiškėjo, kad bandiniai turintys malto stiklo parodė geresnius rezultatus. 15 % malto stiklo turintis betonas ištveria daugiau šaldymo-atšildymo ciklų, nei betonas turintis 10 % malto stiklo. Atlikus mikroskopinę malto stiklo analizę, paaiškėjo, kad švarus maltas stiklas nuo užteršto malto stiklo vizualiai nesiskiria. Dėl gero malto stiklo pasiskirstymo po visą betono masę ir smulkių malto stiklo dalelių dydžio nesusidaro skysto stiklo sancaupų.

Ramšas Paulius. Use of Broken Glass, Isolated From The Municipal Waste Stream, in The Manufacture of Construction Products. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Civil Engineering (H200), Technological Sciences.

Keywords: broken glass, ground glass, concrete, pozzolans.

Kaunas, 2021. 57 p.

### **Summary**

It is a well-known fact that Portland cement production is an ecologically expensive process that is responsible for 5-9 % of anthropogenic (man-made) global carbon emissions. To reduce the environmental impact associated with the production of portland cement, the industrial sector is adapting alternatives to lower prices and environmental damage. Glass waste was investigated as a possible addition to cement.

In order to determine the optimal / rational amount of ground glass in vibropressed products, it is necessary to determine the influence of the amount of different ground glass in the tests on the compressive strength. Because concrete with 30% ground glass showed higher compressive strength than concrete without ground glass, additional tests are required to replace portland cement with ground glass instead of aggregate. A crushing study with samples of clean ground glass and organically contaminated ground glass has shown that contaminated ground glass has similar properties to clean ground glass, so no additional glass cleaning is necessary.

Determining the frost resistance of concrete with different amounts of ground glass showed that specimens with ground glass showed better results. Concrete with 15% ground glass withstands more freezing and thawing cycles than concrete with 10 % ground glass. Microscopic analysis of ground glass revealed that clean ground glass is not visually different from contaminated ground glass. Due to the good distribution of ground glass over the entire mass of concrete and the size of fine ground glass particles, no liquid glass agglomerates.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>9</b>
<b>Santrumpų sąrašas</b> .....	<b>11</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>12</b>
<b>1. Literatūros apžvalga ir analizė</b> .....	<b>13</b>
1.1. Stiklo atlieka .....	13
1.2. Stiklo rūšys .....	13
1.3. Stiklo atliekų panaudojimas.....	15
1.4. Stiklo reaktyvumas.....	17
1.5. Stiklo įtaka betono savybėms .....	19
1.6. Stiklo panaudojimas grindinio trinkelėse .....	22
1.7. Silicio poveikis sveikatai.....	23
<b>2. Eksperimentinė dalis</b> .....	<b>24</b>
2.1. Tyrimo objektas, tikslas ir uždaviniai .....	24
2.2. Tyrimams naudotos medžiagos ir jų savybės .....	24
2.3. Tyrimų metodai.....	25
2.4. Malto stiklo kaip priedo prie užpildo tyrimas.....	31
2.4.1. Betono gaminių gniuždymo stiprio nustatymo rezultatai.....	33
2.4.2. Betonų vidutinio tankio nustatymo rezultatai.....	36
2.4.3. Betono atsparumas šalčiui prognozavimas ir nustatymas .....	39
2.4.4. Betono atsparumo šalčiui nustatymas .....	41
2.5. Tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM) .....	48
<b>Išvados</b> .....	<b>53</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>54</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Tipinė cemento ir oksidinio silikato stiklo cheminė sudėtis.....	14
<b>2 lentelė.</b> Bandinių sudėtys .....	31
<b>3 lentelė.</b> Sudėčių aprašymas .....	32
<b>4 lentelė.</b> Betonų gniuždymo stiprio rezultatai .....	33
<b>5 lentelė.</b> Betonų vidutiniai tankiai.....	36
<b>6 lentelė.</b> Betono poringumo parametrai .....	41



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> "EPA" duomenimis, stiklo atliekų metiniai kiekiai rodikliai [3].....	13
<b>2 pav.</b> Kristalinio silicio dioksido (kvarco, a) ir amorfinio silicio dioksido (stiklo, b) atominės struktūros palyginimas .....	14
<b>3 pav.</b> Šarminės korozijos paveikto plono betono sluoksnio nuotrauka (matymo laukas 5 mm) (Tomas ir kt. 2013) .....	18
<b>4 pav.</b> Šarminio gelio morfologija (Oyan ir kt. 2013).....	18
<b>5 pav.</b> Betono grindinio trinkelė gamybos technologija.....	22
<b>6 pav.</b> Rutulinis malūnas.....	24
<b>7 pav.</b> 0/0,250 mm frakcijos maltas stiklas.....	25
<b>8 pav.</b> Skiedinio maišytuvas "Automix" .....	26
<b>9 pav.</b> Bandinių formavimas cilindrinėje formelėje.....	27
<b>10 pav.</b> Vibracinis stalas „SMZ-539“.....	27
<b>11 pav.</b> Bandiniai vandens vonelėje .....	27
<b>12 pav.</b> Sukalibruotos svarstyklės „WLC 20/A2“ .....	28
<b>13 pav.</b> Slankmatis.....	28
<b>14 pav.</b> Betoninių gaminių paviršių paruošimas .....	29
<b>15 pav.</b> Hidraulinis presas „Toni Technik 2020“ .....	29
<b>16 pav.</b> Hidroterminio kietinimo kamera.....	30
<b>17 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui bandymo schema.....	30
<b>18 pav.</b> Šaldymo kamera T-25/1.1 .....	31
<b>19 pav.</b> Betonų su ŠMS gniuždymo stiprio rezultatai po 28 p.....	33
<b>20 pav.</b> Betonų su ŠMS gniuždymo stiprio rezultatai po 28 p.....	34
<b>21 pav.</b> Betonų su UMS gniuždymo stiprio rezultatai po 28 p.....	34
<b>22 pav.</b> Betonų su ŠMS gniuždymo stiprio rezultatai po HA.....	35
<b>23 pav.</b> Betonų su UMS gniuždymo stiprio rezultatai po HA .....	36
<b>24 pav.</b> Betonų su ŠMS tankiai po 28 p.....	37
<b>25 pav.</b> Betonų su ŠMS tankiai po 28 p.....	37
<b>26 pav.</b> Betonų su UMS tankiai po 28 p.....	38
<b>27 pav.</b> Betonų su ŠMS tankiai po HA.....	38
<b>28 pav.</b> Betonų su UMS tankiai po HA.....	39
<b>29 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui priklausomybės grafikas nuo atsparumo šalčiui kriterijaus $K_s$ ... 40	40
<b>30 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 0 ciklų .....	42
<b>31 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 4 ciklų .....	42
<b>32 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 13 ciklų .....	43
<b>33 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 21 ciklų .....	43
<b>34 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 28 ciklų .....	44
<b>35 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 28 ciklų. 1 ir 5 var. ....	44

<b>36 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 37 ciklų .....	45
<b>37 pav.</b> Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 45 ciklų. Bandymas nutraukiamas .....	46
<b>38 pav.</b> Bandiniai prieš šalčio bandymą .....	47
<b>39 pav.</b> Bendras bandinių vaizdas po 28 šaldymo-atšildymo ciklų .....	47
<b>40 pav.</b> Atrinkti prasčiausiai atrodantys bandiniai po 28 ciklų.....	48
<b>41 pav.</b> Skenuojantis elektronų mikroskopas „FEI Quanta 200 FEG” .....	49
<b>42 pav.</b> Švaraus malto stiklo skenuojančio elektroninio mikroskopo ir elementinės analizės rezultatai.....	50
<b>43 pav.</b> Užteršto malto stiklo skenuojančio elektroninio mikroskopo ir elementinės analizės rezultatai.....	51

## Santrumpų sąrašas

### Santrumpos:

MS – maltas stiklas;

ŠMS – švarus maltas stiklas;

UMS – organinėmis medžiagomis užterštas maltas stiklas;

HA – hidroterminis bandinių apdorojimas;

BŠK – betono šarminė korozija;

$f_{cb}$  – 3 gniuždytų bandinių gniuždymo stiprio vidurkis.

## Įvadas

Tikslas:

Nustatyti optimalų / racionalų malto stiklo kiekį vibropresuojamuose gaminiuose.

Uždaviniai:

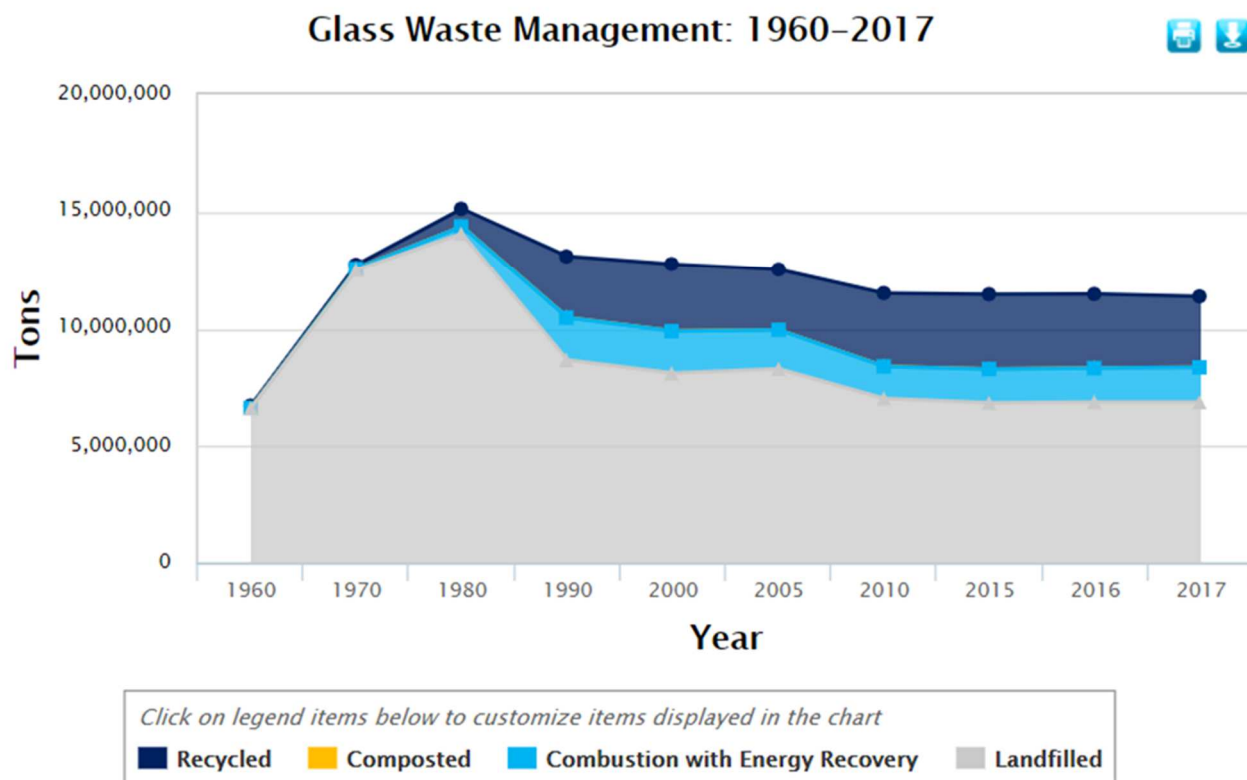
- 1) nustatyti, kokią įtaką gniuždymo stipriui turi skirtingo malto stiklo kiekis bandymuose;
- 2) išsiaiškinti, ar organinėmis medžiagomis užterštas maltas stiklas turi didelę neigiamą įtaką betono gniuždymo stipriui;
- 3) nustatyti skirtingą malto stiklo kiekį turinčio betono atsparumą šalčiui;
- 4) atlikti mikroskopinę stiklo atliekų analizę.

Gerai žinomas faktas, kad portlandcemenčio gamyba yra ekologiškai brangus procesas, kuris yra atsakingas už 5-9 % antropogeninės (žmogaus sukulto) globalinės anglies dioksido emisijos. Norint pagaminti vieną toną cemento gaunama apie vieną toną anglies dvideginio. Taip pat portlandcemenčio gamyba yra daug energijos reikalaujantis procesas, kuris atsako už 10-15 % pasaulio pramonės energijos sunaudojimo ir maždaug 25 % pasaulio pramonės anglies dioksido emisijos. Kad sumažintų poveikį gamtai, susijusį su portlandcemenčio gamyba, t. y. betonu, pramonės sektorius pritaiko alternatyvas mažinančias kainas ir aplinkai daromą žalą.

Stiklo atliekos buvo ištirtos kaip galimas mineralinis priedas betonui.

## 1. Literatūros apžvalga ir analizė

### 1.1. Stiklo atlieka



1 pav. "EPA" duomenimis, stiklo atliekų metiniai kiekiai rodikliai [3].

United States Environmental Protection Agency – "EPA", duomenimis, didžioji dalis stiklo yra neperdirbama, bet gabenama į sąvartynus, kur irsta iki 900 m [3]. O per pastaruosius dešimtmečius matome, kad perdirbamas stiklo kiekis nepakito. Iki 7 Mt stiklo kas metus atsiduria šiukšlynuose.

Pagal „Šiaulių regiono atliekų tvarkymo centro“ skelbiamą informaciją, stiklo atliekos kaip atrūšiuotą medžiagą galima gauti iš stiklui skirtų konteinerių [2]. Jų nurodymu, į stiklo pakuotės konteinerį mesti galima:

- butelius,
- stiklainius,
- stiklo duženas,
- nereikalingus stiklo indus.

Todėl yra labai aktualu - surasti stiklo atliekoms naujų ir inovatyvių perdirbimo būdų. Vienas iš jų, panaudoti stiklo atliekas, kaip antrines statybines medžiagas betono gamybai.

### 1.2. Stiklo rūšys

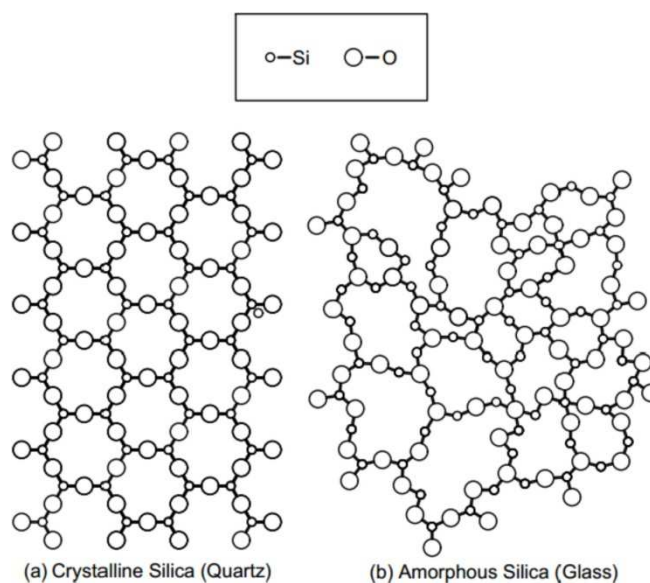
Daugumą komercinių stiklų galima suskirstyti į šešias rūšis: silikato oksidinis stiklas, švino stiklas, borosilikatinis stiklas, aliumosilikatinis stiklas, 96% silicio dioksido stiklas ir lydytas silicio dioksido stiklas (stiklinis silicio dioksidas) [8]. Oksidinio silikato stiklo kompozicija sudaryta iš 60–75 %

silicio dioksido, 12–18 % natrio ir kalio oksido, 5–12 % kalkių, kurios apibendrintos 1 lentelėje. Švino stiklas sudarytas iš ne mažiau kaip 20 % švino oksido, borosilikatiniame stikle yra ne mažiau kaip 5 % boro oksido, o aliumosilikatiniame stikle yra aliuminio oksido [8]. Devyniasdešimt šeši procentai silicio dioksido stiklo yra borosilikatinis stiklas, kuris yra išlydomas ir apdorojamas siekiant pašalinti ne silikatinius komponentus. Lydytas silicio stiklas yra grynas silicio dioksidas, kuris yra nekristalinis (žr. 2 pav.). Silikato oksidinis stiklas iš kalcio yra labiausiai paplitęs, jis sudaro 90 proc. pagaminto stiklo, dar vadinamo „konteinerių stiklu“ [8].

**1 lentelė.** Tipinė cemento ir oksidinio silikato stiklo cheminė sudėtis

Oksidai	Cementas, %	Stiklas, %
CaO	60,2–68,7	5–12
SiO <sub>2</sub>	18,7–24,4	60–75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2–6,3	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2–6,1	–
MgO	0,3–4,8	–
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0,05–1,2	12–18
SO <sub>3</sub>	1,7–4,6	–

Yra dvi formos, pagal kurias silicio dioksidas skirstomas į kategorijas: kristalinis silicio dioksidas ir amorfinis silicio dioksidas (žr. 2 pav.). Kristaliniai silikatiniai mineralai gamtoje dažniausiai būna kvarco, kristobalito ir tridimito pavidalu ir yra linkę mažiau reaguoti portlandcemenčio sistemoje dėl ilgos grandinės, išdėstytos grotelių struktūros [1]. Amorfinis silicio dioksidas (stiklas) neturi ilgos grandinės tvarkos ir yra įvairus. Stiklas paprastai sukuriamas kaitinant ir lydant smėlį (silicio dioksidą), sodos pelenus (natrio karbonatą) ir kalkakmenį (kalcio karbonatą) iki maždaug 1400–1600 °C ir greitai jį aušinant. Šildant virš lydymosi taško, kristalinė silicio dioksido struktūra tampa amorfinė, o greitas aušinimas neleidžia kristalinei struktūrai antrą kartą formuotis. Kvarco dūmai, lakieji pelenai ir stiklas yra visos amorfinio silicio dioksido formos, nors kiekviena jų gaminama skirtingai.



**2 pav.** Kristalinio silicio dioksido (kvarco, a) ir amorfinio silicio dioksido (stiklo, b) atominės struktūros palyginimas

Kadangi stiklo pagrindinė sudedamoji dalis yra  $\text{SiO}_2$ , tai vienas iš betonų, kuriame yra  $\text{SiO}_2$  - pucolaninis portlandcementis [4]. Pucolaniniame portlandcemenčio sudėtis ir savybės:

aktyviųjų  $\text{SiO}_2$  nemažiau 25 %;

padidėjęs atsparumas vandeniui, druskoms;

ekonomiškesnis;

blogiau praleidžia vandenį;

neatsparus  $\text{CO}_2$  – karbonizacijos, poveikiui [5].

Amorfinis silicio dioksidas turi didesnę tirpimo laipsnį nei kristalinis silicio dioksidas betone [1]. Nors kristalinis silicio dioksidas tirpsta aukšto pH aplinkoje, tokioje kaip betonas, amorfinis silicio dioksidas tirpsta nepriklausomai nuo pH ir turi didesnę tirpimo greitį nei kristalinis silicio dioksidas. Didesnę tirpimo greitį galima paaiškinti palyginus jų atomines struktūras. Amorfinis silicio dioksidas (stiklas) yra struktūrizuotas atsitiktinai, taigi, mažiau struktūriškas nei kristalinis silicio dioksidas, kuris suteikia daugiau vietų reaktyvumui ir padidina hidratacijos greitį ankstyvame amžiuje (2 pav. parodytas aukščiau aprašytų atominių struktūrų vaizdas). Dėl šių veiksnių galima daryti išvadą, kad stiklas, betono sistemoje, sukelia pucolaninę reakciją [9].

### 1.3. Stiklo atliekų panaudojimas

Kadangi stiklo perdirbimas išlieka opia problema, jo atliekų panaudojimui Lu Žianas Ksinas ir kiti siūlo statybinei paskirčiai, kaip betono savybių pagerinimui [13]. Autorių tyrimu buvo siekiama sukurti ekologišką surenkamojo betono gaminį, pritaikius iš atliekų atrinktą stiklą. Stiklo atliekos buvo naudojamos kaip smulkus užpildas ir kaip dalinis rišiklis stiklo miltelių pavidalu (SM) grindinio blokuose. Rezultatai parodė, kad stiprumas buvo pastovus, nepaisant stiklo duženų (SD) kiekio didinimo trinkelėse sudėtyje. Bendras SM ir SD panaudojimas buvo naudingas sumažinant vandens įgerį ir džiovimo susitraukimą trinkelėse normų ribose. Be to, papildomas SM kiekis galėtų sėkmingai sumažinti šarminės korozijos riziką, sukeltą stiklo duženų.

Įsipareigojimai sumažinti išmetamo  $\text{CO}_2$  kiekį ir turimų gamtos išteklių mažinimą daro betono sektoriui spaudimą rengti tvaresnius metodus [16]. Atliekų medžiagos plačiai naudojamos gaminant betoną. Atliekų medžiagų tinkamumas ir praktiškumas dėl betono savybių daugiausia siejamas su šviežio ir sukietėjusio betono savybėmis. Atliekų panaudojimas gali būti įmanomas tik tuo atveju, jei sėkmingai patenkinamas aplinkos ir ekonominis tvarumas. Šiuo atžvilgiu šio tyrimo tikslas buvo ištirti šviežias ir sukietėjusias vienodo 28 d. projektinio stiprumo (45 MPa) betono, pagaminto iš natūralių užpildų ir 5 % ir 10 % marmuro dulkių, savybes, pakeičiančią portlandcemenčio ir portlandcemenčio mišinį, kurio 20 % sudarė perdirbto stiklo smėlis kaip natūralaus smėlio pakaitalas. Tada buvo atliktas papildomas išsamus tyrimas, siekiant įvertinti laboratorinių mišinių ekologinį ir ekonominį tvarumą.

Rezultatai parodė, kad naudojant atliekas buvo gautos panašios šviežios savybės kaip kontroliniame mišinyje. Perdirbamame stiklo smėlio ir marmuro dulkių mišiniuose 28 d. gniuždomojo kubo stiprumas sumažėjo 10–19 %. Tyrimai, vertinantys kitas betono savybes, įskaitant garso pralaidumą, šilumos laidumą ir vandens pralaidumą, parodė geresnius rezultatus atliktus su stiklo smėlio ir marmuro dulkių mišiniais. Kalbant apie tvarumo rodiklius, marmuro dulkės ir perdirbto stiklo smėlio

mišiniai turėjo mažesnę poveikį aplinkai, bet didesnes sąnaudas, palyginti su įprastu betonu. Atsižvelgiant į bendrą eksploatacinių savybių analizę, marmuro dulkės ir perdirbtas stiklo smėlis parodė, kad eksploatacinės savybės pagerėjo atitinkamai 17 % ir 8 %, atskleidžiant perspektyvų tvarios betono gamybos sprendimą.

Nafisa Tamana siūlo perdirbtą stiklo atliekas efektyviai panaudoti kaip dalinį smėlio pakaitalą betone [17]. Buvo atlikta daugybė bandymų, siekiant nustatyti sudedamųjų dalių, šviežio betono ir sukietėjusio betono savybes, įskaitant jo patvarumo charakteristikas, siekiant ištirti perdirbto stiklo smėlio atliekų (PSSA) naudojimą betone. Betonas buvo pagamintas pakeičiant natūralų upių smėlį 20 %, 40 % ir 60 % perdirbto stiklo smėliu. Šiame tyrime buvo naudojamas mišrių spalvų kalkių stiklas iš kalcio, kurį surinko Kernso regioninė taryba, Australijoje. Bandymo rezultatai parodė, kad betonai stipriai pagerėjo. PSSA betonai taip pat parodė geresnę atsparumą chlorido jonų įsiskverbimui. Be to, PSSA pridėjimas žymiai sumažino plėtimąsi dėl šarminio silicio dioksido reakcijos. Eksperimento rezultatai rodo, kad PSSA pridėjimas gali būti geras natūralaus smėlio pakaitalas, todėl gali būti veiksmingai naudojamas pramonėje.

Darbe „Study The Effect of Recycled Glass on The Mechanical Properties of Green Concrete. Energy Procedia“ [24] buvo panaudotas skirtingo tipo perdirbtas stiklas, toks kaip (neoninis, rudas ir žalias stiklas), kuriame yra didelis silicio dioksido ( $\text{SiO}_2$ ) procentas. Šių išmestų medžiagų panaudojimas gali būti laikomas išteklių taupymu. Skirtingos stiklo atliekos, naudojamos kaip dalinis cemento pakeitimas, esant skirtingoms koncentracijoms 11 %, 13 % ir 15 % cemento masės kiekvienam tipui, ir ištirtas jų poveikis mechaninėms betono savybėms. Sumaišius, liejant ir sukietėjus vandenyje ( $20 \pm 2$ ) ° C temperatūroje ties (7, 14 ir 28) dienomis, mechaninės savybės parodė, kad gniuždymo stipris ir lenkimas rodo geriausius rezultatus su neoniniu stiklu 13 % cemento svorio, tuo tarpu didžiausias tempiamasis stipris pasirodė tuo pačiu procentu, bet iš žalio stiklo.

Straipsnis [21] yra paremtas lyginamuoju eksperimentiniu tyrimu, kurio tikslas - į savaimę sutankėjančio betono (SSB) sudėtį įtraukti perdirbtų betono užpildų (PBU) ir perdirbtų stiklo užpildų (PSU) iš „automobilio priekinio stiklo“. Pagrindinis tikslas yra ištirti šių užpildų įtaką šviežio ir sukietėjusio betono savybėms. Norint pasiekti šį tikslą, buvo paruoštos dvi SSB mišinių serijos, natūraliai šiurkščias medžiagas (NŠM) pakeičiant PBU, o PBU - PSU. Pagrindinės SSB savybės buvo matuojamos šviežio betono metu. Nors gniuždymo stipris, vandens absorbcijos bandymai ir skerspjuvio stebėjimai, siekiant įvertinti stabilumą ir atsiskyrimo potencialą, buvo atlikti sukietėjusiems betonams. Jei NŠM pakeičia PBU, nepatartina naudoti smulkių ir perdirbtų betono užpildų, nes neįmanoma užtikrinti tėkmės kriterijų. Eksperimento rezultatai parodė, kad slankumo bandymas davė 610 mm skersmenį. Taip pat L-dėžutės blokavimo santykis buvo apribotas iki 0,2. PBU pakeitimas PSU neturėjo reikšmingos įtakos pradiniam nuosmukiui, visos gautos vertės viršija minimalią 650 mm ribą. Įtempis ir plastinis klampumas, nustatyti empirinėmis lygtimis, atitinka tuos, kurie buvo stebimi naudojant tradicinį SSB. PSU ir SSB mišinių gniuždymo stipris sumažėjo padidinus perdirbto stiklo kiekį, tačiau išlieka savaimę sutankėjančių betonų stiprumo diapazone. Rezultatai parodė, kad SSB galima gaminti su automobilio stiklo užpildu.

Songas, W., Zou, D., Liu, T., Tengas, J., ir Li, L. tyrė perdirbto katodinių spindulių vamzdelio (KSV) stiklo ir dalelių dydžio įtaka KSV stiklo betono amortizacijos koeficientui laisvojo vibracijos slopinimo metodu [18]. Taip pat buvo įvertintas tankis, vandens absorbcija, stiprumas ir tamprumo modulis. Rezultatai rodo, kad vandens sugertis, tamprumo modulis, gniuždymo stipris ir tempiamasis stipris monotoniškai sumažėjo, kai KSV stiklo kiekis, o KVS stiklo kiekis turėjo ribotą poveikį



slopinimo koeficientui. Apskritai, sukietėjęs tankis, vandens sugertis ir slopinimo santykis sumažėtų, kai didžiausias dalelių dydis sumažėtų nuo 4,75 mm iki 0,60 mm, o padidėtų gniuždymo stipris, tempiamasis stipris ir elastingumo modulis. Tačiau netikėtai sumažėjus KSV stiklo betono gniuždymo stiprumui ir padidėjus amortizacijos koeficientui, didžiausias dalelių dydis sumažėja nuo 1,18 mm iki 0,60 mm. KSV stiklo betono tempiamasis stipris yra nepakankamai įvertintas pagal daugumą esamų betono specifikacijų, kai tempimo stiprumui įvertinti naudojamas gniuždymo stipris. Šios specifikacijos pateikia konservatyvų vertinimą, leidžiantį inžineriniuose projektuose saugiai naudoti perdirbtą KSV stiklo betoną.

Iš komunalinių atliekų srauto išgautos stiklo duženos (SD) buvo išbandytos kaip skysto stiklo pakaitalas gaminant lakiųjų pelenų smulkintą geopolimerinį betoną. Toniolis ir kt. (2018) [38] pasiūlė, kad toks SD ir betono mišinys dar labiau sumažins išmetamo CO<sub>2</sub> kiekį, išsiskiriantį iš šios statybinės medžiagos gamybos. SD taip pat gali būti naudojamas gaminant abrazyvus. Būdamas turtingas silicio dioksido, SD gali būti sunaudotos kaip smulkus užpildas betonui gaminti [39].

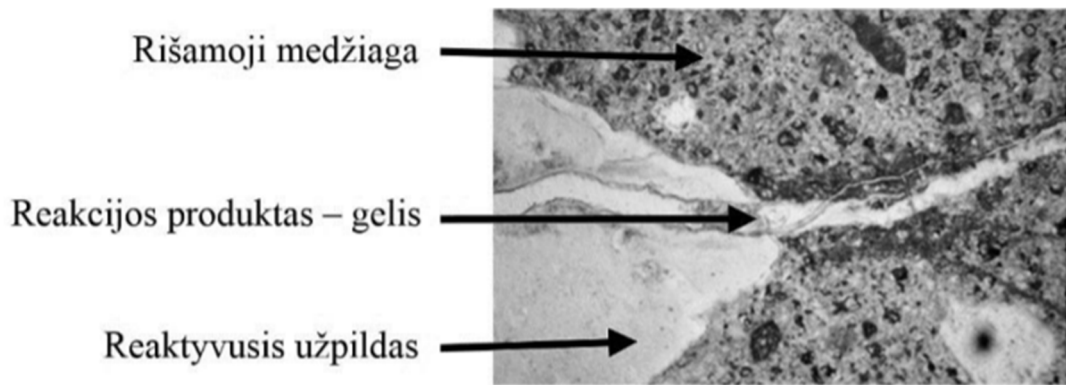
#### 1.4. Stiklo reaktyvumas

Nustatyta, kad cementinio komponento specifinis paviršiaus plotas yra tiesiogiai susijęs su reaktyvumu [10]. Tipiška reakcijos padidėjimo tendencija - mažėjantis dalelių dydis ir didėjantis paviršiaus plotas didina reaktyvumą. Kad stiklą būtų galima naudoti kaip pucolaną, jis turi būti naudojamas smulkių miltelių pavidalu. Stiklas, kurio vidutinis dalelių dydis yra mažesnis, yra reaktyvesnis ir yra mažiau jautrus šarmo ir silicio dioksido reakcijai (ŠSR) dėl pucolaninių reakcijų [11]. Dalelių dydžio diapazonas, kuriame stiklas pradeda mažinti ŠSR, yra dviprasmiškas, nes skirtingi tyrimai pateikia skirtingus diapazonus. Tačiau bendras vidutinis dalelių dydis, kuriame galima pastebėti ŠSR sumažėjimą, yra mažesnis kaip 1 mm [12], tai vadinama „pessimum“ (lot. k. blogiausias) verte. Kiti tyrimai teigia, kad mažesnių kaip 140 μm (0,140 mm) dalelių dydis sukelia pucolaninę reakciją. Dar nenustatyta, kuris dalelių dydis yra pats naudingiausias atsižvelgiant į reaktyvumą, ekonomiškumą ir ŠSR švelninimą.

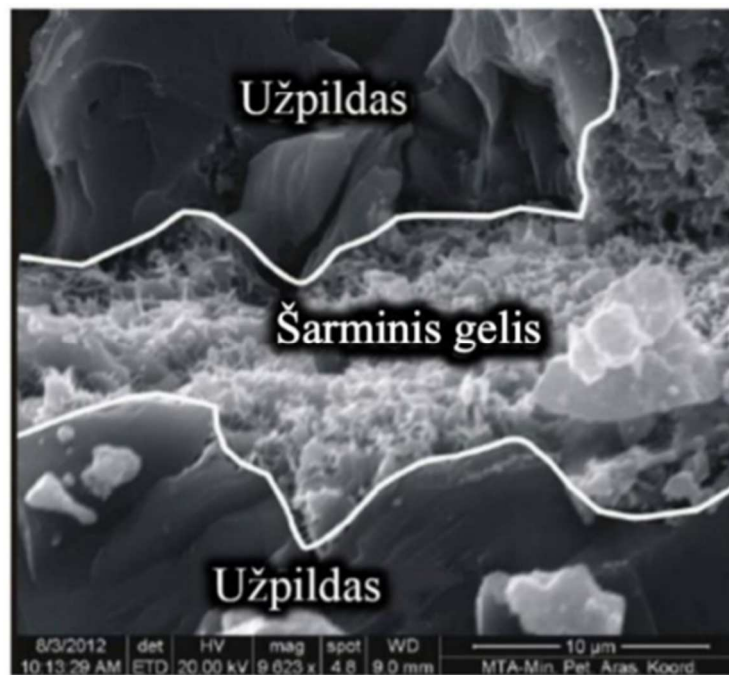
Betono atsparumą šarminiai korozijai didina aktyvieji mineraliniai priedai, tokie kaip: aukštakrosnių šlakai, lakieji pelenai, gamtinis ceolitas ir silicio dioksido mikrodulkės. Dėl šių mineralinių priedų poveikio betonui – svarbu įvertinti karjeruose esančio užpildo užterštumą, nustatyti leidžiamus ribinius priedų kiekius, analizuoti priedų poveikį medžiagos struktūrai, jos savybėms bei atsparumą šarminiai korozijai.

Viena iš pavojingiausių betono cheminės korozijos rūšių – betono šarminė korozija (BŠK). BŠK gali sukelti betono paviršiaus ištrupėjimą, pleišėjimą, net betono konstrukcijos sutrupėjimą [6]. Kadangi karjeruose esančių užterštų užpildų išrinkti neįmanoma, galima tik keisti patį karjerą, todėl ypač svarbu sukurti šarminiai korozijai atsparų betoną.

3 pav. pateikta šarminės korozijos paveikto betono plono sluoksnio petrografinė analizė, kuriai atlikti pasitelktas optinis mikroskopas. Kairėje paveikslėlio dalyje, įsiterpusias tarp cemento matricos matomos kvarcinio smėlio dalelės. Dėl silicio dioksido reakcijos su šarmu, atvertas plyšys prisipildė ir įsiskverbė į greta esantį cementinį akmenį. Cementiniame akmenyje plyšį užpildė reakcijos produktas – šarminis silicio dioksido gelis (Tomas ir kt. 2013). Šarminio gelio mikrostruktūrą galima matyti 4 paveiksle.



**3 pav.** Šarminės korozijos paveikto plono betono sluoksnio nuotrauka (matymo laukas 5 mm) (Tomas ir kt. 2013)



**4 pav.** Šarminio gelio morfologija (Oyan ir kt. 2013)

Betono šarminė korozija – viena iš didžiausių grėsmę keliančių betonui cheminės korozijos rūšių. Ji, nors ir lėtai, bet visam laikui suardo betono turinčias konstrukcijas. Šarminės korozijos procesai veikdami gali sukelti plyšių atsiradimą ant atskirų betoninių konstrukcijų paviršių, suskilinėjimą ir galiausiai suirimą. Norint sustabdyti arba panaikinti šarminę koroziją, galima pasitelkti įvairius cheminius priedus, mineralų pagalbą, kad pagerintume betono cheminę sudėtį.

A. Rutkauskas, rašo, kad šarminė korozija vyksta tarp šarmų ir užpildų, kurių jonai turi teigiamą krūvį, esančių betone ar skiedinyje bei neigiamą krūvį turinčių jonų. Jonai susidaro iš natrio ir kalio šarmų junginių ir užpilduose esamų reaktyvių uolienu, kurių pasitaiko stambiuose ir smulkiuose užpilduose.

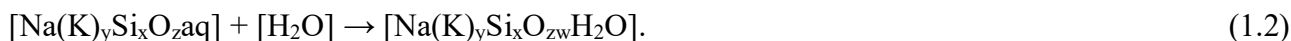
Vienas iš šarminės korozijos cheminės reakcijų pavyzdžių:

reaktyvusis silicis užpilde + šarmai betone → šarminis silicio gelis



Antrajame etape vandens paveiktas šarminis silicio gelis pradeda plėstis:

šarminis silicio gelis + drėgmė → išsiplėtęs šarminis silicio gelis



Besiplečiantis silicio gelis užpildo esamas betone ertmes, o tada sukelia vidinius įtempius, kol betonas suyra [14]. Todėl labai svarbi yra prevencija nuo šarminio gelio susidarymo.

Silicio dioksido mikrodulkės, kaip priedas, betoną įtakoja įvairiai. Apie jo daromą įtaką betono ilgaamžiškumui ir stipriui Ganeša Babu ir kiti [12] pasitelkdami įvairių autorių darbus apibendrina silicio dioksido mikrodulkių įtaką betono stipriui. Pastebėta, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių optimalų kiekį ankstesniuose darbuose rekomenduojama priimti 10 %, o vėlesniuose darbuose rekomenduojamas kiekis svyruoja tarp 30 % ir 40 % silicio dioksido mikrodulkių. Praktikoje silicio dioksido mikrodulkių pridedama kur kas mažiau, nes yra smarkiai įtakojiama betono plastiškumas ir technologinės betono savybės.

Kai Ganeša Babu ir kiti apibendrina virš 100 autorių darbus, besivadovaudami principu – betono gniuždymo stipris yra tiesiogiai įtakojiama V/C, buvo pasiūlytas efektyvumo faktorius „k“. Efektyvumo faktorius susideda iš dviejų dalių: bendro, kuris yra pastovus visiems procentiniams pridedamo silicio dioksido mikrodulkių kiekiams ir procentinio efektyvumo faktoriaus, kuris kinta nuo procentinio pridedamo silicio dioksido mikrodulkių kiekio. Faktorius „k“ naudojamas vandens kiekiui skaičiuoti, skirto mišinio maišymui. Savo teoriją, autoriai patikrino eksperimentais. Pastebėta, kad silicio oksido mikrodulkės stiprina betono stiprį ir didina betono ilgaamžiškumą. Silicio oksido mikrodulkės turi ir neigiamą įtaką, kai yra keičiamas cementas į silicio dioksido mikrodulkes, mažo bei vidutinio stiprio betonuose, pagreitinama armatūros korozijos pradžia. Kiti autoriai taip pat sutinka, kad pucolanai skatina armatūros koroziją. Dėl pucolanų reakcijos su betone esančiomis laisvosiomis kalkėmis, sumažinamas betono bazingumas, o bazingumas yra pagrindinė armatūros korozijos prevencija gelžbetonyje. Tačiau, tame pačiame literatūros šaltinyje, taip pat teigiama, kad šie priedai didina betono tankį, taip atsverdami bazingumo betone sumažinimą. Ganeša Babu ir kiti teigia, kad kitų autorių darbuose nurodoma, kad silicio dioksido mikrodulkės, kaip priedas, naudojant iki 20 %, pagerino sukibimą tarp betono ir armatūros nesukeldamas armatūros išankstinės korozijos. Betonų, kurių sudėtyje yra silicio dioksido mikrodulkių, atsparumas šaldymo-atšildymo ciklams yra panašus, kaip betonų be silicio oksido mikrodulkių. Tačiau pastebėtas didesnis atsparumas šalčiui didelio stiprio betonuose, kurių gamyboje neviršytas  $V/C = 0,35$  santykis.

### 1.5. Stiklo įtaka betono savybėms

Šlifuito stiklo atliekos buvo naudojamos kaip skiedinio užpildas ir jokios reakcijos nebuvo aptiktos su smulkiomis dalelėmis, tokiu būdu nurodant, kad stiklo atliekos gali būti pakartotinai naudojamos skiedinyje ir betone. Be to, stiklo atliekos teigiamai veikia skiedinio mikrostruktūrines savybes, todėl rinktis jas yra praktiška, norint pagerinti jo mechanines savybes [33]. Neseniai buvo atlikti kai kurie tyrimai, siekiant užkirsti kelią ŠSR išplėtimui betonuose ir rastas stiklo atliekų perdirbimo metodas [34]. Topcu ir Kanbazaras [35] teigia, kad 4-16 mm dydžio stiklo atliekos buvo naudojamos kaip užpildas betone ir jos sumažino betono gniuždymo stiprį. Tiriantė Park ir kt. [36] panaudojo stiklo atliekas, kurių dydis 0–5 mm, vietoje 30 % betono užpildo, betono gniuždymo stipris sumažėjo net 4 %. Park ir kt. [36], Topcu ir Kanbazaras [35] savo tyrimuose taip pat nustatė, kad stiklo atliekų

pridėjimas į betoną, pakeičiant užpildą, sumažina betono stiprį. Betono stipris sumažinamas nežymiai, o betono gamybos kaštai yra pastebimai sumažėję.

Stiklo pucolaninės savybės betone pastebimos, kada dalelės mažesnės nei 300  $\mu\text{m}$ , o kai stiklo dalelių dydis mažesnis nei 100  $\mu\text{m}$  - po 90 dienų kietėjimo, stiklas gali turėti pucolaninį reaktyvumą esant mažam cemento/MS santykiui [37]. Tokių MS dalelių dydis gali būti pasiektas naudojant rutulinį malūną, kuris paprastai naudojamas cemento pramonėje (cemento klinkeriui malti). Keli tyrimai rodo, kad perdirbto stiklo ir betono mišinys (kuriame vietoje 15 %–20 % cemento yra MS) suteikia didesnę atsparumą gniuždymui nei kontrolinis betonas. Tačiau apžvalginis Rašedas (2014) tyrime nustatė, kad ankstesni tyrimai su stiklo ir betono mišiniu nebuvo įtikinami, atsižvelgiant į darbingumą ir stiprumą, o betono su pridėtinu stiklu mišinio atsparumas chloridams buvo panašus, palyginti su kontroliniais bandiniais. Rašedas (2014) tyrime išnagrinėjo stiklo miltelių panaudojimo galimybes gaminant tvarų betoną. Buvo atlikti eksperimentiniai darbai naudojant skiedinį iš betono ir stiklo. Buvo paruošti skiedinio mėginiai skirti teslos plastiškumui ir stiprumo savybėms įvertinti. Nustatytas betono gniuždymo stipris gniuždam bandinius.

Stiklo šilumos laidumas ir lydymosi temperatūra įtakoja betono savybes [19]. Buvo žinoma, kad kai stiklo užpildai yra įterpiami į betoną ir betonui daroma aukšta temperatūra, išlydytas stiklo paviršius galėtų veikti kaip rišamoji medžiaga, sušvelnindama aukštą temperatūros žalą tarp fazinėje pereinamojoje zonoje (TPZ) tarp cemento pastos ir stiklo užpildų. Šiame tyrime buvo ištirta stiklo užpildų dalelių dydžio įtaka sauso mišinio stiklo betono blokelių savybėms, veikiant padidėjusiai iki 800 ° C temperatūrai. Siekiant išvengti stiklo pucolaninės reakcijos įtakos, šiame tyrime nebuvo naudojamos <0,3 mm stiklo dalelės. Pastebėta, kad kuo mažesnis stiklo dalelių dydis, tuo geriau pagerėjo aukštos temperatūros charakteristikos. Tai atsitiko dėl didesnio paviršiaus ploto. Skenuojančio elektroninio mikroskopo (SEM) vaizdai parodė, kad po 800 ° C temperatūros poveikio, stiklo užpildų paviršiuje aptikta papildomų kristalinių formų, ten, kur bandiniuose naudoti mažesni stiklo užpildai, o tai rodo, kad labiau ištirpę stiklo paviršiai gali būti naudojami kaip rišamosios medžiagos. nes lieka didesnis gniuždymo stipris po bandinio aušinimo.

Iš mišrių spalvų butelių pagaminti stiklo duženos buvo naudojami betone kaip užpildai [20]. Šiame darbe tikrinamas betono su stiklo atliekomis efektyvumas skirtinguose kiekių etapuose (18 %, 19 %, 20 %, 21 %, 22 %, 23 % ir 24 %), veikiant rūgščioje (sieros rūgšties) atmosferoje. Betono eksploatacinės savybės buvo įvertintos nustatant masės, gniuždymo stiprio ir mikrostruktūros pokyčius. Buvo nustatyta, kad gėrimų buteliai, pagaminti iš kalkių ir kalcio sureagavo vietoj cemento hidratacijos produktų, kai betono mėginiai buvo paveikti rūgščioje aplinkoje ir tokiu būdu apsaugojo cemento hidratacijos produktus nuo pažeidimų, suteikdami konstrukcijai stiprumą. Mikrostruktūrinis tyrimas, kuris buvo atliktas siekiant patvirtinti sukietėjusių savybių rezultatus, atliekant rentgeno spindulių difrakciją, termogravimetrinę analizę, pastebėta, kad hidratacijos produktai yra santykinai mažiau pažeisti stiklo atliekose. Teigiamas stiklo atliekų naudojimo rezultatas buvo veiksmingas tik iki 21 % kiekio betone. Padidėjęs aktyvumas dėl didesnio kaip 21 % stiklo atliekų kiekio sumažino pradines betono mechanines savybes. Tačiau betono mišinių su maksimaliu stiklo atliekų kiekiu (24 %) atsparumas rūgščiai yra didesnis 54 %, atsižvelgiant į gniuždymo stiprį po 90 dienų. Daroma išvada, kad geriausius optimizuotus eksploatacinius parametrus pagal atsparumą gniuždymui ir atsparumą rūgštims galima gauti esant 21 % stiklo atliekų kiekiui.

Putų betone, porų struktūra ir poringumas vaidina lemiamą reikšmę, ypač atsižvelgiant į atsparumą šalčiui [23]. Šio tyrimo tikslas buvo ištirti pucolaninių miltelių: šlako miltelių ir silicio dioksido garų,

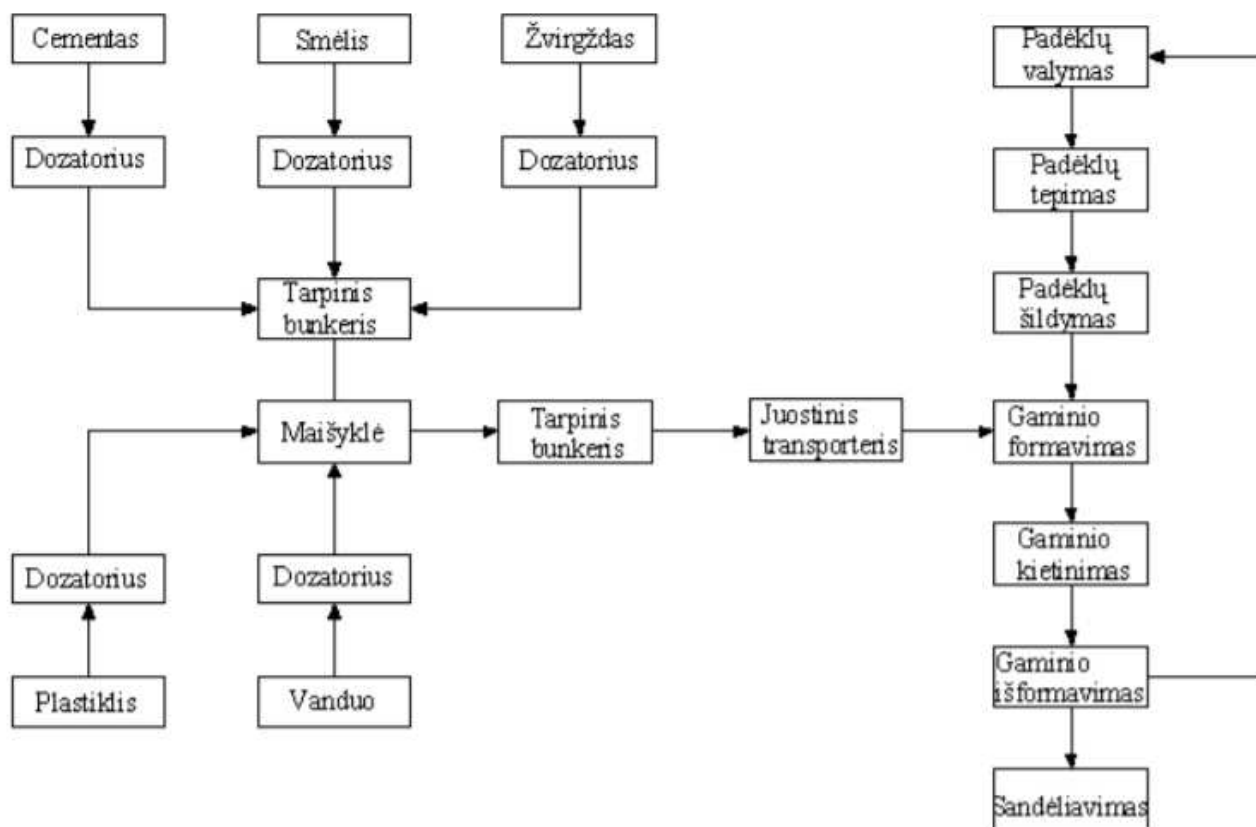
poveikį putų betono porų struktūrai ir atsparumui šalčiui. Porų struktūros ir atsparumo šalčiui santykis bei šalčio pažeidimo mechanizmai buvo išanalizuoti ultragarsiniu neardomuoju bandymu, vaizdo analize ir skenavimo elektroniniu mikroskopu. Rezultatai parodė, kad, kai šlakų miltelių ir silicio dioksido garų kiekis buvo atitinkamai 30 % ir 6 %, atsparumas šalčiui buvo maksimalus, masės nuostoliai buvo atitinkamai 1,76 % ir 1,99 %, o streso nuostoliai - atitinkamai 13,61 % ir 14,49 %. Šlakų milteliai ir silicio dioksido dūmai sumažino poringumą iki 0,503 ir 0,513, kurie buvo 0,102 ir 0,992 mažesni nei kontrolinės grupės. 100–300  $\mu\text{m}$  dydžio porų skaičius padidėjo 6,08 % ir 4,47 %, palyginti su atitinkama kontroline grupe. Rezultatai taip pat parodė, kad porų struktūra buvo optimizuota, kai šlako miltelių ir silicio dioksido garų kiekis buvo atitinkamai 30 % ir 6 %.

Lj, H., Hanifo, A., Usmano, M., Simo, J., ir Ohio, H. tikslas - efektyviai perdirbti stiklo atliekas, vieną iš šalutinių silicio dioksido pagrindų pagamintų produktų, ir panaudoti jas kaip cemento pakaitalą tvariai statybai [22]. Iš stiklo atliekų buvo gaminami išmesto stiklo milteliai (ISM) ir panaudoto stiklo nuosėdos (PSN) ir įvertintas jų tinkamumas naudoti betone kaip dalinį cemento pakeitimą. 20 % cemento (pagal masę) buvo pakeisti į ISM ir PSN, o gautų betonų mechaninės savybės ir patvarumas buvo nustatytos bandymais. Taip pat buvo atlikti poringumo ir fazės identifikavimo tyrimai. Po 90 dienų PSN betonas pasižymėjo aukščiausia gniuždymo jėga. Taip pat nustatyta, kad PSN įterpimas į betoną sumažino akytumą dėl didesnio jų pucolaninio aktyvumo dėl būdingo amorfinio PSN pobūdžio. Atsparumo šalčiui ir chlorido jonų skvarbumo tyrimai taip pat parodė, kad PSN pagerina šias savybes. Po 50 šaldymo-atšildymo ciklų, su ISM ir PSN sujungtų betonų masės nuostoliai, palyginti su įprastu betonu, buvo mažesni atitinkamai 24 % ir 36 %. Taip pat PSN įterpimas sumažino chlorido jonų skvarbumo koeficientą 24 %. Apibendrinant, rezultatai rodo, kad PSN yra pranašesnis už ISM betono mechaninių, mikrostruktūrinių ir patvarumo savybių gerinime, todėl jo naudojimas betone padės tvariai plėtrai dėl efektyvaus atliekų panaudojimo, sumažinti išmetamo anglies dioksido kiekį ir sumažinti gamybos sąnaudas.

Pūnas ir Lamas [25] paruošė ekologiško betono bloką su 50 % stiklo duženomis (SD) ir 50 % perdirbtu užpildu. Rezultatas parodė, kad didelę vandens absorbciją galima sumažinti naudojant SD gaminant betoninius blokus ir betono blokelius. Be to, betono blokeliuose, paruoštuose su stiklo užpildais, pagerėjo atsparumas dilumui [26]. Lingas ir Pūnas [27] nurodė, kad sauso mišraus betono grindinio trinkelėse kaip alternatyvus smulkus užpildas buvo naudojamas nebenaudojamas katodinių spindulių vamzdžių stiklas, siekiant sumažinti džiovinimo susitraukimą ir vandens absorbciją. Bet katodinių spindulių vamzdžių stiklo kiekis betoniniams blokams gaminti turėtų būti apribotas iki maždaug 25 % stiklo dėl galimo švino išplovimo. Lj ir kt. tyrimas [28] parodė, kad labai smulkaus SD įtraukimas padidino betoninių blokelių gniuždymo stiprį dėl labai smulkių stiklo dalelių pucolaninės reakcijos. Be to, pagerinus fotokatalitinius (reakcijos greičio pagreitėjimas arba sulėtėjimas cheminėse reakcijose šviesos pagalba) oro teršalų šalinimo parametrus, SD buvo įterptas kartu su  $\text{TiO}_2$  į grindinio trinkeles dėl didelio SD šviesos pralaidumo charakteristikos [29]. Tačiau kalbant apie SD naudojimą cemento pagrindų pagamintose medžiagose, didžiausią susirūpinimą kelia galimas šarmo ir silicio dioksido reakcijos (ŠSR) išsiplėtimas dėl stiklo dalelių. Remiantis neseniai atliktu darbu [30], sausoje mišraus stiklo betone esančios didesnės poros gali sutalpinti ŠSR gelį, todėl ŠSR gelio išsiplėtimas buvo mažiau kenksmingas nei įprastame mišraus stiklo turinčiame betone. Be to, papildomų cementinių medžiagų (PCM), tokių kaip lakiųjų pelenų ir metakaolino pridėjimas gali dar labiau sumažinti ŠSR stiklo turinčiuose betono blokuose [31].

## 1.6. Stiklo panaudojimas grindinio trinkelėse

Dar svarbiau yra tai, kad sauso mišraus betono grindinio trinkelėlių gamybos būdas yra rentabilus (taupus) dėl trumpo jo gamybos ciklo laiko. Remiantis šiais pranašumais, Honkonge sauso mišinio grindinio trinkelės, paruoštos su stiklo atliekomis, nuo 2010 m. buvo plačiai naudojamos įvairiose kelių priežiūros sutartyse, viešuosiuose darbuose ir būsto projektuose [32]. Sauso betono grindinio trinkelėlių gamybos technologija parodyta 5 pav.



5 pav. Betono grindinio trinkelėlių gamybos technologija

Iki 25 % visų užpildų (įskaitant didelius ir smulkius užpildus) norima pakeisti SD atliekomis (kaip smulkaus užpildo dalis) betoninių grindinio trinkelėlių gamyboje. Todėl reikia iširti padidėjusio stiklo atliekų kiekio grindinio trinkelėse galimybę. Šio tyrimo tikslas buvo suprojektuoti ekologišką betono grindinio bloką, maksimaliai panaudojant stiklo atliekas. Stiklo atliekos buvo naudojamos ne tik kaip smulkus užpildas, bet ir kaip SMP (stiklo miltelių pavidalu) keičiant cementą. Tyrimo metu buvo siekiama visiškai pakeisti smulkius užpildus SD atliekomis, tuo tarpu iki 20 % cemento buvo pakeista maltu stiklu (MS), kad dar labiau pagerintų grindinio trinkelėlių veikimą. Nustatytos sukurtų grindinio trinkelėlių fizinės savybės (tankis, vandens sugertis), mechaninės savybės (atsparumas gniuždymui) ir patvarumas (ŠSR, džiūvimo susitraukimas).

Kad betoninės konstrukcijos tarnautų visą jų eksploataavimo laikotarpį, būtina atsižvelgti į ilgaamžiškumo parametrus. Nerimą keliantis pavojus – betono atsparumo nusidėvėjimas, esant rūgščiai atmosferai (sieros rūgščiai). Kai betonas patenka į tokią terpę, betono ilgaamžiškumas sumažėja, o tai pasireiškia betono paviršiaus pažeidimais. Šie pažeidimai rodo reakcijos produktų, kurie pažeidžia betono paviršių, susidarymą, dėl kurių keičiasi betono masė, dydis ir forma [40].

## 1.7. Silicio poveikis sveikatai

Silicis sukelia didžiausią riziką sveikatai, po asbesto, statybų sektoriuje dirbantiems darbuotojams [7]. Žmogus ilginiui kontaktuodamas su kristaliniu silicio dulkėmis padidina riziką susirgti plaučių vėžiu ir kitais kvėpavimo takų ligomis. Kristalinio silicio dulkės, pagal tarptautinę vėžio tyrimų agentūrą (IARC), priskiriamos 1-os grupės kancerogenams. 1-os grupės kancerogenas yra laikomas aiškiu vėžį sukeliančia medžiaga. Nustatyta, kad Europos Sąjungoje apie 5 milijonai darbuotojų kontaktuoja su kristaliniu silicio dioksidu ir veikiama jų sveikata. Iš paminėtų 5 milijonų darbuotojų, dauguma yra statybų sektoriaus darbuotojai arba gamina statyboje naudojamus dirbinius: stiklą, cementą, blokelių ar plytas. Dauguma šių žmonių dirba mažose įmonėse, o jose dirba ne daugiau kaip 10 žmonių, todėl būtina skatinti žmonių sąmoningumą bei paaiškinti apie apsaugines priemones.

Kadangi ruošiant magistro darbą, man pačiam teko susidurti su stiklo duženomis - pačiam malti stiklą, noriu pabrėžti pasirengimo saugiam darbui su silicio dulkėmis svarbą, nes keliami pavojai žmogaus sveikatai gali pasireikšti tik praėjus dešimtmečiams.

## 2. Eksperimentinė dalis

### 2.1. Tyrimo objektas, tikslas ir uždaviniai

Magistro baigiamajame darbe naudojamas taikomas tyrimo metodas. Reikia surasti stiklo iš komunalinių atliekų srauto pritaikymą betono produktui.

Darbo tikslas – nustatyti optimalų / racionalų malto stiklo kiekį vibropresuojamuose gaminiuose.

Magistro baigiamojo projekto uždaviniai:

nustatyti, kokią įtaką gniuždymo stipriui turi skirtingo malto stiklo kiekis bandymuose;

išsiaiškinti, ar organinėmis medžiagomis užterštas maltas stiklas turi didelę neigiamą įtaką betono gniuždymo stipriui;

nustatyti skirtingą malto stiklo kiekį turinčio betono atsparumą šalčiui;

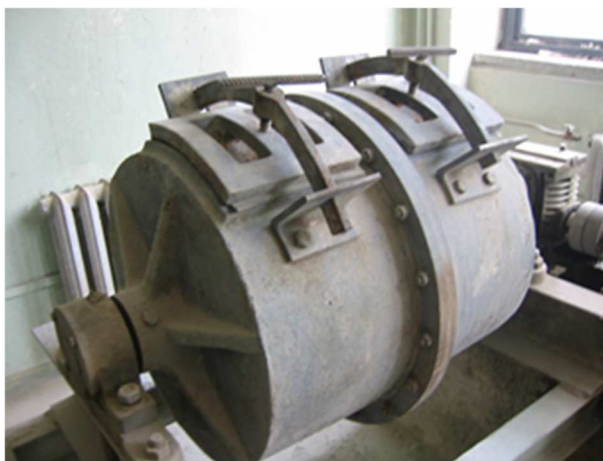
atlikti mikroskopinę stiklo analizę.

### 2.2. Tyrimams naudotos medžiagos ir jų savybės

#### Maltas stiklas

Kadangi iš UAB „Ekotera“ buvo gautos ir švarios, ir organinėmis medžiagomis užterštos stiklo duženos, tai reikėjo pasigaminti maltą stiklą (žr. 7 pav.) naudojant rutulinį malūną (žr. 6 pav.). Panaudojus Bleino prietaisą [41], gautas savitasis malto stiklo paviršius – 3050 cm<sup>2</sup>/g. Malto stiklo pagrindinis cheminis komponentas SiO<sub>2</sub>.

Malto stiklo pagrindinės savybės: frakcija – 0/025; savitasis paviršius – 3050 cm<sup>2</sup>/g. Pagal LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus, užpildo savybės tenkina.



6 pav. Rutulinis malūnas





7 pav. 0/0,250 mm frakcijos maltas stiklas

### **Užpildas**

Smulkus užpildas - smėlis fr. 0/2, iš Zatyšių karjero. Bandiniams naudotas neprasijotas smėlis ir, frakcijos patikrinimui, prasijotas pro 2 mm stambumo sietą smėlis.

### **Cementas**

Statyboje dažniausiai naudojama portlandcementis bei sudėtinis portlandcementis. Pagrindinės portlandcemenčio sudedamosios dalys yra klintys ir molis taip pat kaip priedas (nedidelis kiekis) pridedamas ir gipsas, kuris reguliuoja rišimosi trukmę.

Tyrimų metu naudotas AB „Akmenės cementas“ portlandcementis - EN 197-1-CEM I 42,5 R, 42,5 stiprumo klasės didelio ankstyvojo stiprumo portlandcementis. Cemento gniuždymo stipris, MPa po 2 parų  $28 \pm 2$ , po 28 parų  $54 \pm 3$ .

### **Vanduo**

Bandymui buvo naudojamas vanduo iš miesto vandentiekio sistemos. Yra žinoma, kad šis vanduo nėra užterštas chloridais, nitratais rūdinėmis priemaišomis ar kitais nepageidaujamas cheminiais elementais, kurie galėtų padaryti neigiamą įtaką betonui. Vandens pH  $> 4$ , organinių priemaišų ne daugiau kaip 20 mg/l, bei ištirpusių druskų ne daugiau kaip 2 %. Naudotas vanduo yra priskiriamas geriamojo vandens tipui. Taip pat tenkina LST EN 1008:2005 „Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant gražinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti“ standarto reikalavimus.

## **2.3. Tyrimų metodai**

### **Reglamentavimas**

Šiame skyriuje nurodomi standartai ir reglamentai pagal kuriuos atliekami tyrimai.

LST EN 12390-3:2019 „Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris“ Standartas, kuris pateikia gniuždymo stiprio nustatymo reikalavimus [42].

CEN/TS 12390-9:2016 „Testing hardened concrete. De-icing salts were used to test the freeze–thaw resistance“ standartas, kuriuo nustatoma viena iš svarbiausių betono savybių – ilgaamžiškumas, nustatomi betono atsparumo šalčiui ciklai [43].

LST EN 206:2013+A1:2017 „Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis.“ standartas, kuriame nurodomi pagrindiniai betonui taikomi reikalavimai [44].

LST EN 12390-7:2019 „Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis“. Pagal šį standartą buvo apskaičiuojamas betono tankis [45].

### **Maišymas**

Bandymo metu visos medžiagos buvo dozuojamos pagal masę. Teisingai atsverus medžiagas pagal reikiamą sudėtį jos supilamos į sausą dubenį. Vanduo bei kiti skysti komponentai nepilami. Maišumui naudojamas skiedinio maišytuvas „Automix“ (žr. 8 pav.). Pirmiausiai 1 mm sumaišoma sausa mišinio dalis iki kol gaunamas homogeninis mišinys. Vėliau supilamas reikiamas vandens kiekis. Mišinys maišomas 3 minutes.

### **Bandinių formavimas**

Mišinys supilamas į suteptą cilindro  $d = 51$  mm formą, kuri skirta sausam betono mišiniui. Sutankinus vibraciniu stalu „SMZ-539“ ir priekrovos pagalba (žr. 10 pav.), bandinys atsargiai išimamas iš formos. Forma pravaloma ir sutepama – paruošiama naujam bandinio formavimui. Procesas kartotas iki kol baigiasi užmaišytas mišinys (žr. 9 pav.). Sauso betono mišinio formuoti bandiniai buvo parą laikomi ore, kad pakankamai sukietėtų ir juos būtų galima lengviau perkelti į vandenį, kur jie tęs rimosi ir kietėjimo laikotarpį (žr. 11 pav.).



**8 pav.** Skiedinio maišytuvas “Automix”



9 pav. Bandinių formavimas cilindrinėje formelėje

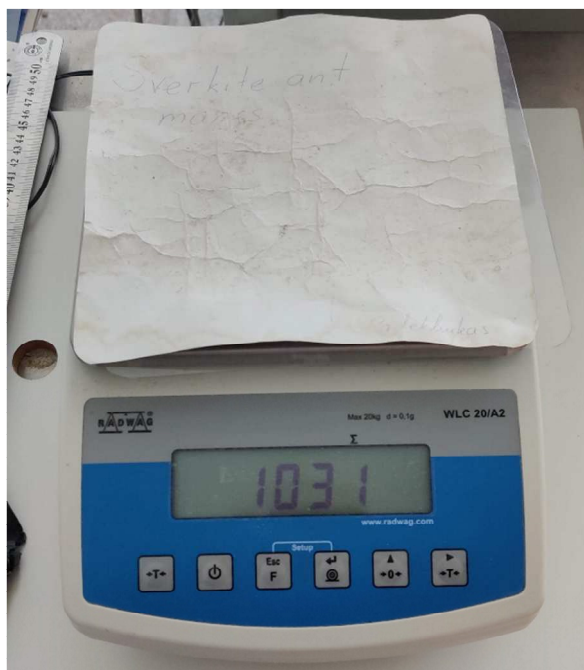


10 pav. Vibracinis stalas „SMZ-539“



11 pav. Bandiniai vandens vonelėje

Bandinio tankis nustatomas medžiagos masės ir tūrio santykiu. Detalus betono tankio nustatymo metodas pateikiamas LST EN 12390-7:2019 standarte. Tyrimui naudojamos sukalibruotos svarstyklės (žr. 12 pav.) (paklaida 0,1 g) masei nustatyti, slankmatis (žr. 13 pav.) – bandinio skersmens ir aukščio matmenų nustatymui (tūrio skaičiavimui). Tos pačios sukalibruotos svarstyklės (žr. 12 pav.) buvo naudojamos sverti medžiagų kiekius.



12 pav. Sukalibruotos svarstyklės „WLC 20/A2“



13 pav. Slankmatis

LST EN 12390-3:2019 „Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris“ standarte nurodomas betono bandinių stiprio gniuždant metodas [42]. Bandiniai gniuždomi iki suirimo bandymo mašina. Užrašoma didžiausia bandinio atlaikoma apkrova ir apskaičiuojamas betono gniuždymo stipris.

Iki bandinio padėjimo į hidraulinį presą (žr. 15 pav.) nuo jo paviršiaus nušluostoma perteklinė drėgmė ir paliekama džiūti 15 min. Tuo tarpu, kruopščiai nuvalomi visi mašinos atraminiai paviršiai ir nuo bandinio paviršiaus pašalinami laisvi grūdėliai šlifuojant (žr. pav. 14), kad būtų kokybiškas sąlytis su mašinos plokščių paviršiais.



**14 pav.** Betoninių gaminių paviršių paruošimas

Tarp bandymo mašinos plokščių ir bandinio nededami jokie intarpai, išskyrus tarpo reguliavimo blokus. Bandiniai padedami taip, kad bandinio centras sutaptų su apatinės plokštelės centru +/- 1 % nurodyto cilindro skersmens dydžio tikslumu.

Prenkamas pastovus apkrovos didinimo greitis. Apkrova bandiniui perduodama be smūgių ir nepertraukiamai didinama pastoviu 0,6 MPa/s greičiu tol, kol toliau nedidėja. Gniuždymo stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f = F/A . \quad (2.3.1)$$

F- didžiausia ardomoji apkrova [N]; A – bandinio skerspjūvio plotas [mm<sup>2</sup>], kuri veikė gniuždymo jėga, kuri apskaičiuota iš bandinio skersmens.



**15 pav.** Hidraulinis presas „Toni Technik 2020“

## Kietinimo procedūra

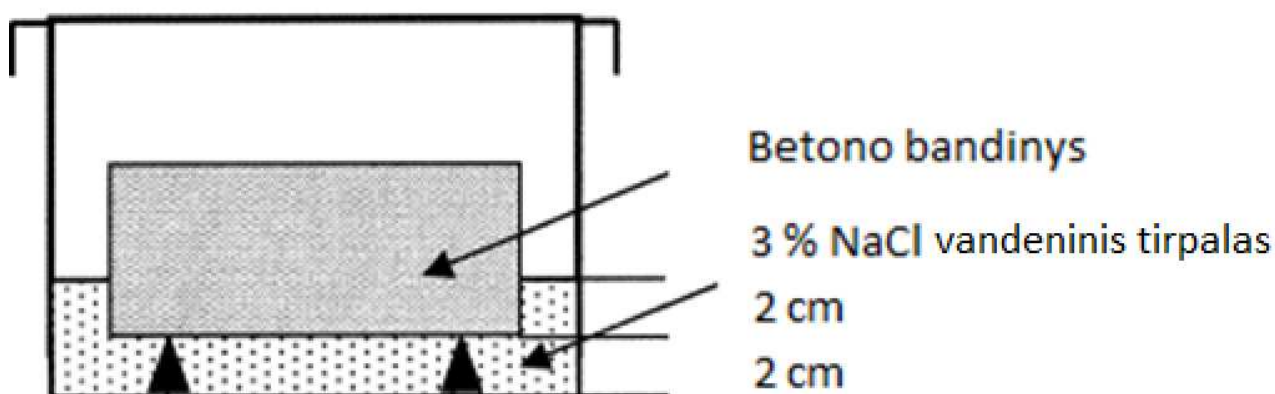
Praėjus 28 paroms po bandinių patalpavimo į vandens vonelę (žr. 11 pav.) buvo parinkta po 3 bandinius ir perkelta į hidroterminio kietinimo kamerą (žr. 16 pav.), kur parą buvo palaikoma 60 ° C temperatūra ir santykinis drėgnumas - 100 %. Tokiu būdu norėta išvengti bandinių visiško nesukietėjimo po 28 parų.



16 pav. Hidroterminio kietinimo kamera

## Atsparumas šalčiui

Betono atsparumas šalčiui vertinamas pagal CEN/TS 12390-9:2016 „Testing hardened concrete. De-icing salts were used to test the freeze–thaw resistance“ [43]. Išrinktų vizualiai geriausiai atrodančių betono bandinių svoris nustatytas kalibruotomis svarstyklėmis. Pasverti betono gaminiai patalpinti į indą, kur buvo apsemti 1/3 savojo aukščio 3 % NaCl vandeniniu tirpalu (žr. 17 pav.). Dažniausiai atliekami 28 šaldymo ir atšildymo ciklai stebint, ar neatsiranda vizualinių destruktivių procesų ir masės nuostolių. Kadangi šaldymo ir atšildymo įrenginys, šaldymo kamera T-25/1.1 (žr. 18 pav.), atlikdavo vieną ciklą per parą, tai bandinių būseną buvo stebima kas kelias dienas



17 pav. Betono atsparumo šalčiui bandymo schema



18 pav. Šaldymo kamera T-25/1.1

#### 2.4. Malto stiklo kaip priedo prie užpildo tyrimas

Eksperimentinė dalis prasideda nuo išsiaiškinimo koks betono mišinys tinkamas ŠMS panaudojimui. Buvo paruošti 9 skirtingų sudėčių variantai po 9 bandinius (2 lentelė). Iš paruoštų mišinių buvo suformuoti daugiau kaip 81 cilindro formos bandiniai, kol baigdavosi paruoštas betono mišinys.

2 lentelė. Bandinių sudėtys

Komponentas	Bandinio varianto Nr.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Medžiaga	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cementas (kg)	480	480	480	480	480	480	480	480	480
Smėlis (kg)	1880	1832	1808	1832	1808	1880	1832	1784	1736
Vanduo (l)	130	130	130	130	130	130	130	130	130
ŠMS (kg)	-	48	72	-	-	-	48	96	144
UMS (kg)	-	-	-	48	72	-	-	-	-
Plastiklis AC 310 (kg)	-	-	-	-	-	2,4	2,4	2,4	2,4

### 3 lentelė. Sudėčių aprašymas

Bandinio varianto numeris	Sudėties aprašymas
1	Bazinė sudėtis
2	10 % švarus maltas stiklas
3	15 % švarus maltas stiklas
4	10 % užterštas maltas stiklas
5	15 % užterštas maltas stiklas
6	Be malto stiklo su plastikiu
7	10 % švarus maltas stiklas su plastikiu
8	20 % švarus maltas stiklas su plastikiu
9	30 % švarus maltas stiklas su plastikiu

Praėjus 28 paroms po bandinių patalpinimo į vandens vonelę buvo parinkta po 3 bandinius iš 1-5 variantų ir perkelta į hidroterminio kietinimo kamerą, kur parą buvo palaikoma 60° C temperatūra ir santykinis drėgnumas - 100 %. Tokiu būdu norėta išvengti bandinių visiško nesukietėjimo po 28 parų. Po paros hidroterminėje kameroje skaitoma, kad pucolaninės reakcijos įvyko pilnai ir bandiniai įgavo didesnę kaip 95 % galutinio stiprio.

6-9 variantų bandiniai formuoti naudojant priekrovą ir pakeičiant sudedamuosius kiekius pridedant tik ŠMS ir naudojant plastikį „Sika AC 310“ (0,5 % nuo cemento kiekio), o smėlis buvo prasijotas pro 20 mm frakcijos sietą.

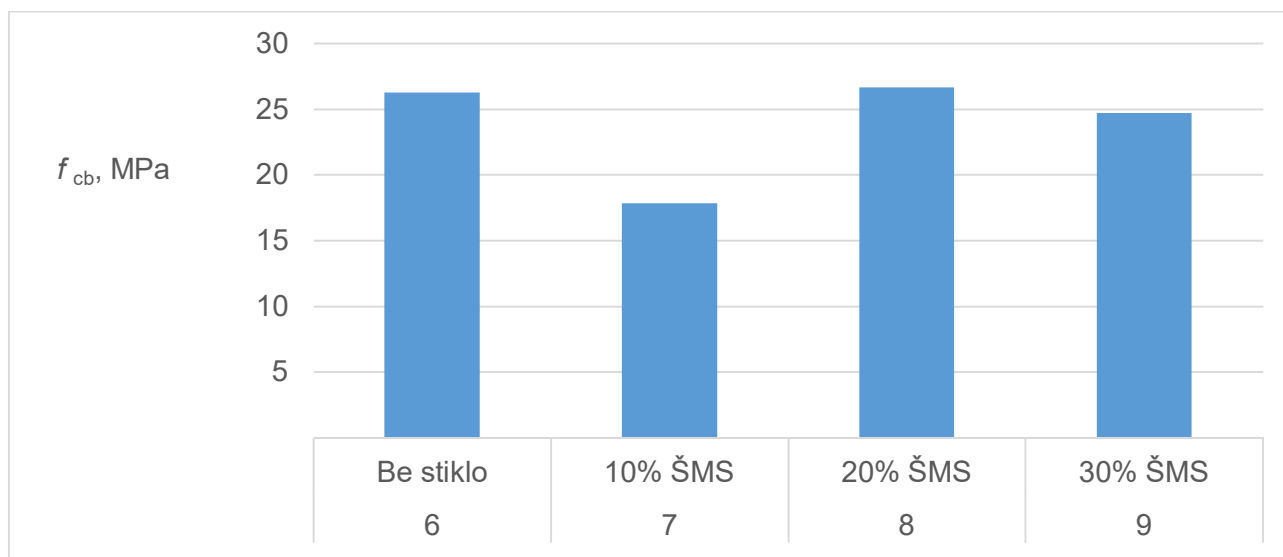
Visų bandinių paviršiai buvo paruošiami. Tada nustatomi bandinių matmenys slankmačiu ir kiekvienas pasveriamas sukalibruotomis svarstyklėmis. Po svėrimo, bandiniai perkeliama ir sugniuždomi hidrauliniu presu, kad būtų galima nustatyti bandinių gniuždymo stiprį.



## 2.4.1. Betono gaminių gniuždymo stiprio nustatymo rezultatai

4 lentelė. Betonų gniuždymo stiprio rezultatai

Nr.	Bandinys	$f_{cb}$ , MPa
Po 28 p. kietėjimo vandenyje		
1	Be stiklo	9,1
2	10 % ŠMS	9,4
3	15 % ŠMS	10,8
4	10 % UMS	11,0
5	15 % UMS	10,6
6	Be stiklo	26,2
7	10 % ŠMS	17,8
8	20 % ŠMS	26,6
9	30 % ŠMS	24,7
Po HA		
1	Be stiklo	8,6
2	10 % ŠMS	10,9
3	15 % ŠMS	10,1
4	10 % UMS	10,6
5	15 % UMS	12,3

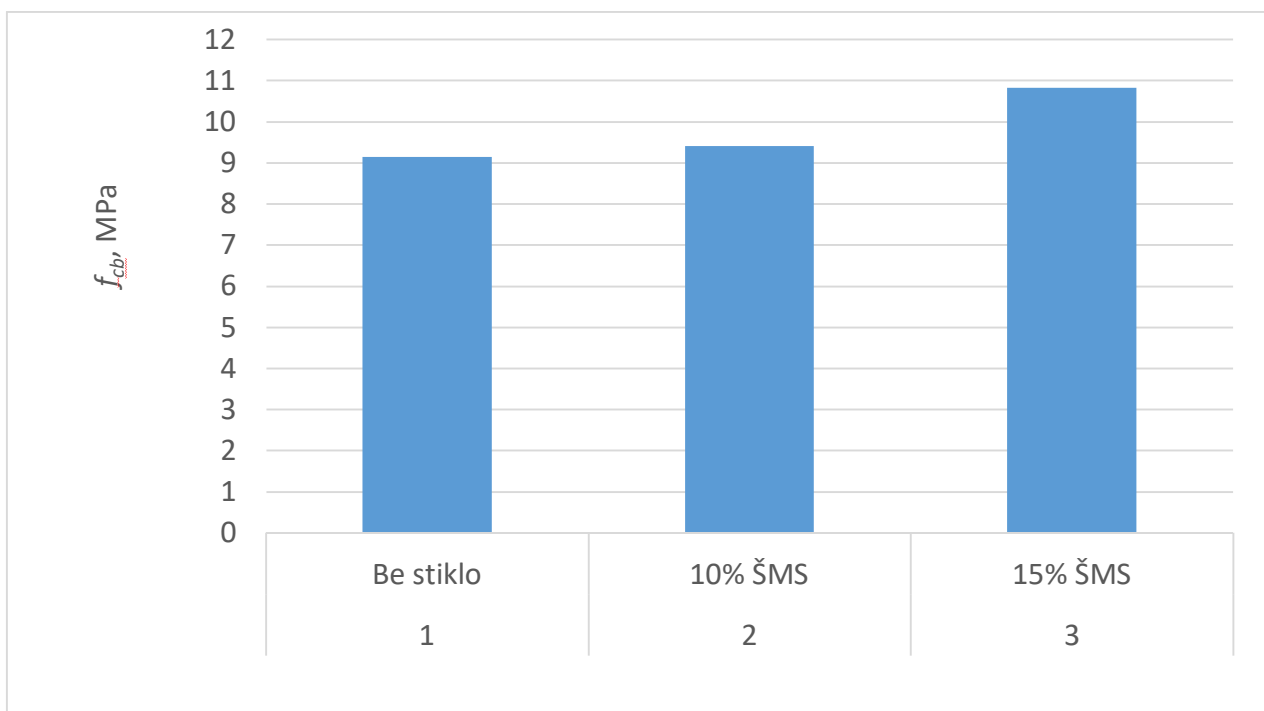


19 pav. Betonų su ŠMS gniuždymo stiprio rezultatai po 28 p.

Pastebėjimai: iš 19 paveikslėlio pastebima, kad vidutinis betono gniuždymo stipris mažiausias, kur naudota 10 % ŠMS - 1/3 silpnesni nei 6 var. bandiniai, kurie yra be ŠMS. Bandiniai su 20 % malto stiklu parodė didesnę gniuždymo stiprį nei bandiniai be malto stiklo. Bandiniai su 30 % malto stiklu turi mažesnę gniuždymo stiprį nei bandiniai su 20 % malto stiklu ir bandiniai be malto stiklo. Gali būti, kad didinant malto stiklo kiekį, susidaro pucolaniniai dariniai, kurie stiprina betoną, tačiau kai pridama per didelis pucolanų kiekis (9 var.), pucolanai sunaudoja  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ir sumažina betono

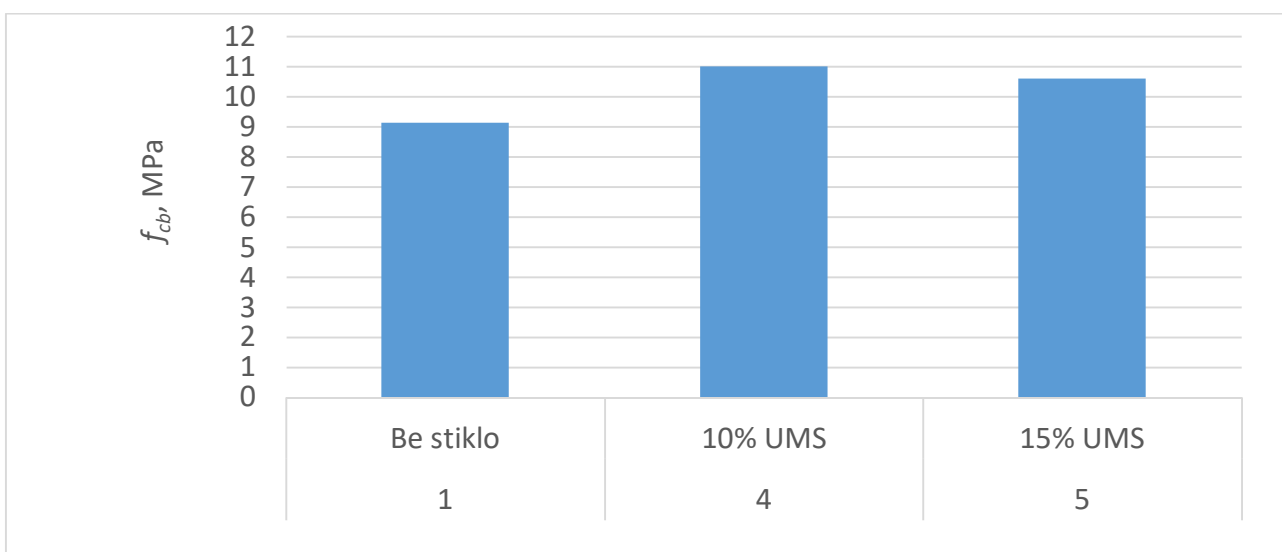
bazingumą, taip sustabdydami pucolaninę reakciją ir sumažindami C-S-H formavimąsi dėl mažesnio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kiekio.

Naudojant ŠMS betone yra riba, ties kiek galima dėti ŠMS kaip mineralinį priedą. Didžiausią gniuždymo stiprį gauname naudojant 20 % ŠMS. ŠMS yra galimas betono priedas, naudojant 20 % vietoje užpildo. Kadangi 8 var. bandiniai su 20 % ŠMS turi didesnę gniuždymo stiprį nei bandiniai be ŠMS, galima sutaupyti cemento, vietoje jo, betono gamyboje naudojant maltą stiklą. Tikslų kiekį reikia dar nustatyti tolimesniais bandymais, keičiant ne užpildą į ŠMS, o cementą.



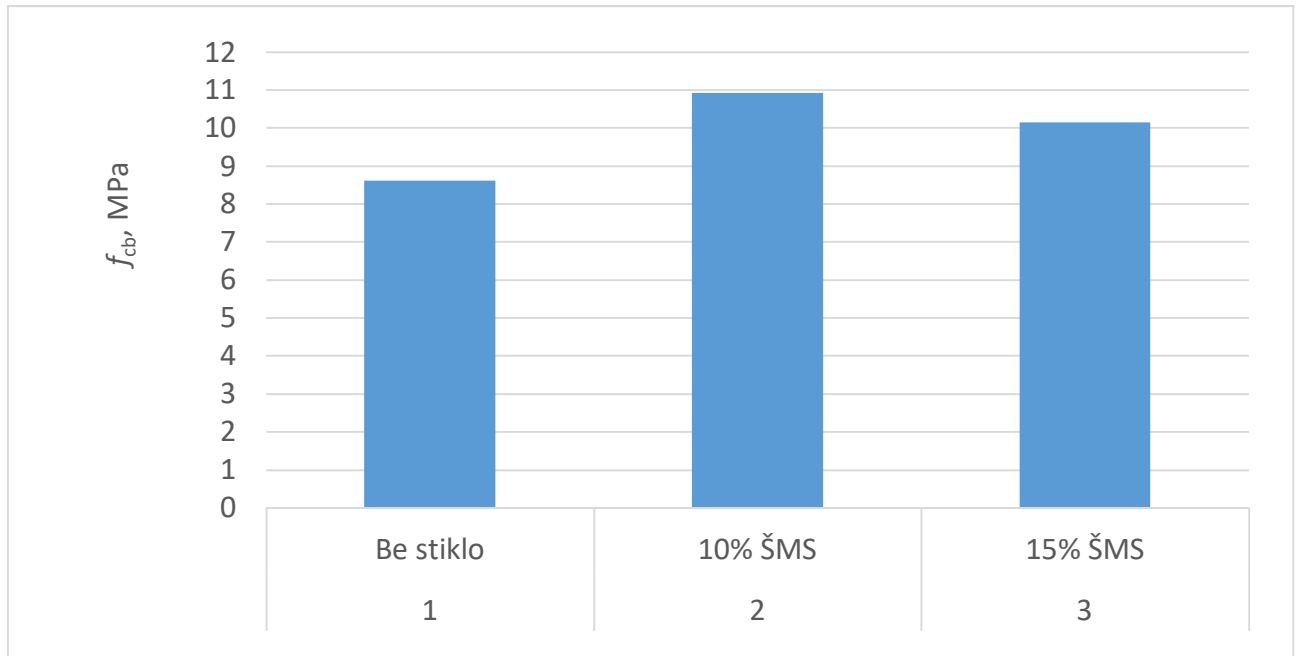
20 pav. Betonų su ŠMS gniuždymo stiprio rezultatai po 28 p.

Pastebėjimai: iš 20 pav. galima daryti išvadą, kad vidutinis betono gniuždymo stipris didėja, keliant švaraus malto stiklo kiekį bandiniuose ir yra didžiausias su 15 % ŠMS kiekiu. Vadinasi, turėjo susidaryti pucolaniniai dariniai ir suformuoti stiprią betono matricą.



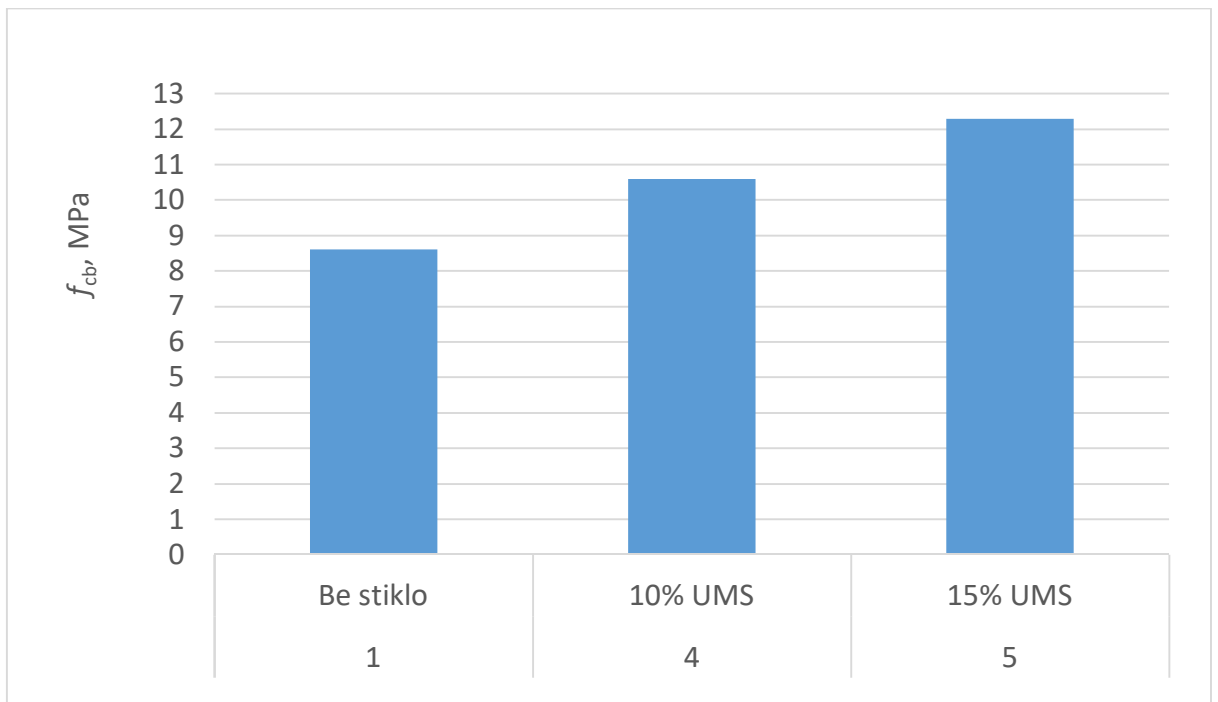
21 pav. Betonų su UMS gniuždymo stiprio rezultatai po 28 p.

Pastebėjimai: kaip ir su ŠMS, bandiniai su UMS parodė didesnę pasipriešinimą gniuždymui, tačiau didžiausią gniuždymo stiprį turi bandiniai su 10 % UMS, kur su švariu maltu stiklu, didžiausią gniuždymo stiprį turėjo 15 % turintis švaraus malto stiklo. Gali būti, kad organinės medžiagos, esančios užterštame maltame stikle, sulėtina pucolaninę reakciją ir bandinys su 15 % užterštu stiklu nespėjo visiškai sukietėti.



**22 pav.** Betonų su ŠMS gniuždymo stiprio rezultatai po HA

Pastebėjimai: gniuždymo stiprio bandymai atlikti po terminio apdorojimo rodo, kad didžiausias gniuždymo stipris yra bandinių turinčių 10 % ŠMS. Gali būti, kad  $\text{SiO}_2$  nespėjo ištirpti šarminėje  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aplinkoje ir susiformavo natrio skystas stiklas, kuris galėjo susilpninti bandinių su 15 % švariu maltu stiklu gniuždymo stiprį.



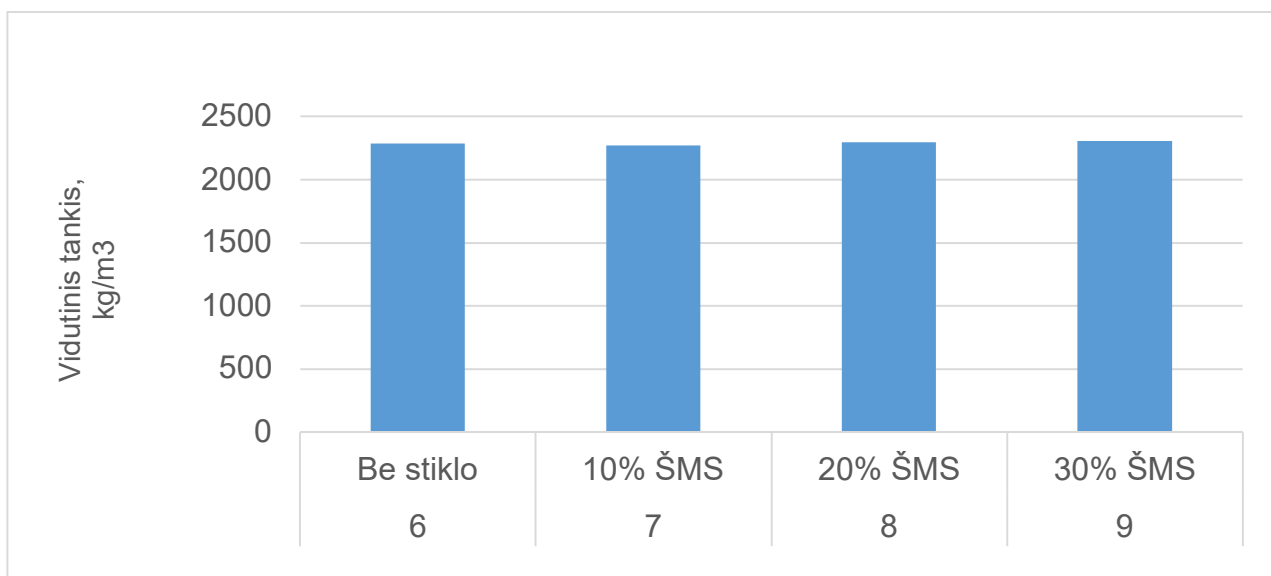
**23 pav.** Betonų su UMS gniuždymo stiprio rezultatai po HA

Pastebėjai: bandiniai po terminio apdorojimo su UMS parodė teigiamą malto stiklo įtaką gniuždymo stipriui. Didinant malto stiklo kiekį bandiniuose, pastebimas tiesioginis santykis su gniuždymo stiprio didėjimu. Galima daryti išvadą, kad maltas stiklas pagerina betono mechaninę savybę – gniuždymo stiprį.

#### 2.4.2. Betonų vidutinio tankio nustatymo rezultatai

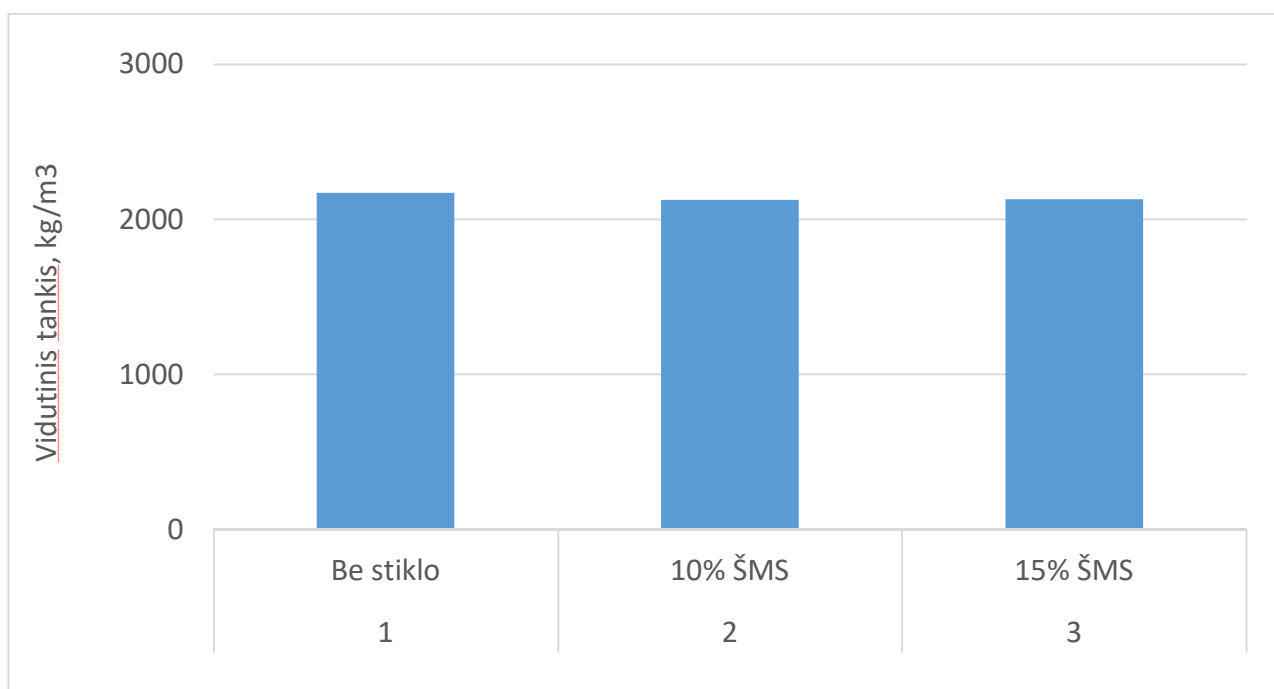
**5 lentelė.** Betonų vidutiniai tankiai

Nr.	Bandinys	Vidutinis tankis, kg/m <sup>3</sup>
Po 28 p. kietėjimo vandenyje		
1	Be stiklo	2167
2	10 % ŠMS	2122
3	15 % ŠMS	2128
4	10 % UMS	2155
5	15 % UMS	2153
6	Be stiklo	2283
7	10 % ŠMS	2267
8	20 % ŠMS	2294
9	30 % ŠMS	2306
Po HA		
1	Be stiklo	2155
2	10 % ŠMS	2144
3	15 % ŠMS	2170
4	10 % UMS	2159
5	15 % UMS	2184



**24 pav.** Betonų su ŠMS tankiai po 28 p.

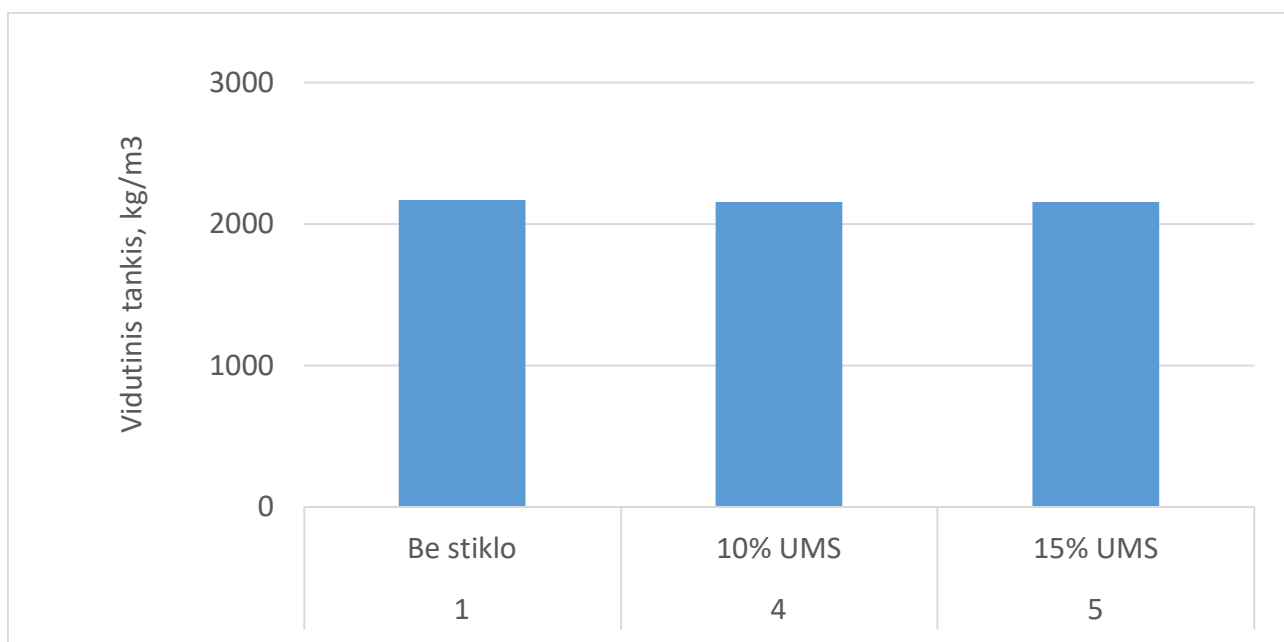
Pastebėjimai: 24 pav. grafike nėra ryškių tankio pokyčių tarp skirtingų bandinių variantų. Nors tankis smarkiai nesikeičia, tačiau galima įžiūrėti tiesioginę tankio ir gniuždymo stiprio priklausomybę po 28 kietėjimo parų. Bandiniuose didinant MS kiekį, didėja tankis. Nors 7 var. bandinio tankis su 10 % MS yra mažesnis nei kontrolinio 6 var. bandinio be MS, bandinio su 20 % MS (t. y. 8 var.) tankis yra artimiausias 6 var., o 9 var. bandinio su 30 % MS tankis yra didžiausias. Bandiniai galėjo būti smarkiau sutankinti dėl technologiškai geresnių betono savybių, kurios pagerėjo dėl pridėto papildomo malto stiklo.



**25 pav.** Betonų su ŠMS tankiai po 28 p.

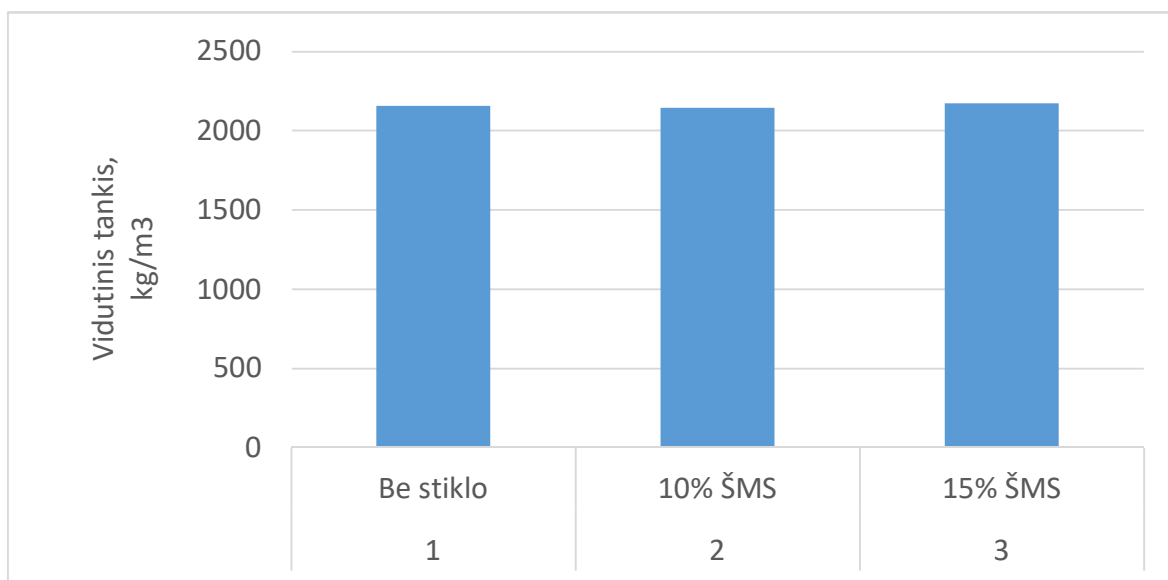
Pastebėjimai: po 28 p. kietėjimo vandenyje bandinių su švriu malto stiklu tankis yra mažesnis, nes pakeista dalis smėlio į maltą stiklą, malto stiklo savitasis tankis yra mažesnis už smėlio. Bandinių su

15 % švairiu maltu stiklu tankis yra didesnis už bandinių su 10 % maltu stiklu dėl galimai nevisiško bandinių nusausinimo prieš sveriant.



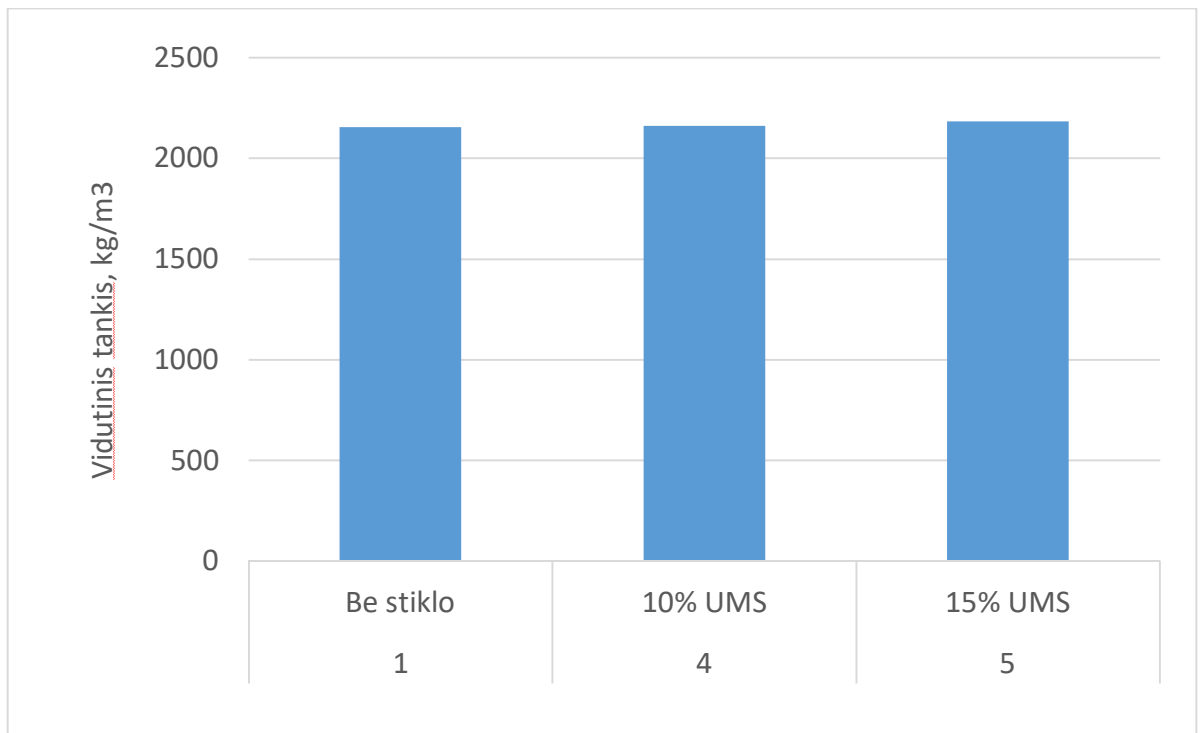
**26 pav.** Betonų su UMS tankiai po 28 p.

Pastebėjimai: kadangi buvo pakeista dalis užpildo – smėlio, maltu stiklu, t. y. medžiaga turinčia didesnę savitąją tankį į medžiagą su mažesniu savituoju tankiu, gaunama, kad didinant bandiniuose malto stiklo kiekį, sumažinamas bandinių tankis.



**27 pav.** Betonų su ŠMS tankiai po HA

Pastebėjimai: bandinių su 15 % ŠMS tankis galėjo padidėti dėl susidariusių naujadarų, papildomo bevandenio natrio silikato kiekio.



**28 pav.** Betonų su UMS tankiai po HA

Pastebėjimai: bandinių su nešvariu maltu stiklu tankis galėjo padidėti dėl susidariusių naujadarų, kaip papildomo bevandenio natrio silikato kiekio.

Betono gniuždymo stipris bandinių 1-5 var. yra sąlyginai nedidelis, tačiau rezultatų palyginimui tai neturi įtakos.

Organinėmis medžiagomis užteršto malto stiklo bandinių gniuždymo stipris nežymiai skiriasi nuo bandinių, kuriuose naudotas švarus maltas stiklas. Nebūtinai organinėmis medžiagomis užteršto stiklo valymas.

### 2.4.3. Betono atsparumas šalčiui prognozavimas ir nustatymas

Pagal LST EN 206-1:2002/A2:2005 standartą betonai, kurie yra eksploatuojami aplinkos sąlygose, kurių kategorijos yra XC4 ir XF3, privalomas didžiausias V/C santykis nebūtų didesnis kaip 0,45, o mažiausiai cemento leidžiama naudoti 320 kg/m<sup>3</sup>. Tai pat turi būti naudojami atsparūs šalčiui užpildai ir nelaidus vandeniui betonas. Kai reikia pagaminti labai šalčiui atsparų betoną (F300), siūloma, kad V/C santykis neviršytų arba būtų lygus 0,40.

Betono atsparumo šalčiui kriterijumi  $K_s$ , galima prognozuoti bandinio atsparumą šalčiui.  $K_s$  skaičiuojamoji formulė:

$$K_s = \frac{P_u}{0,09P_a}, \quad (2.4.3.1)$$

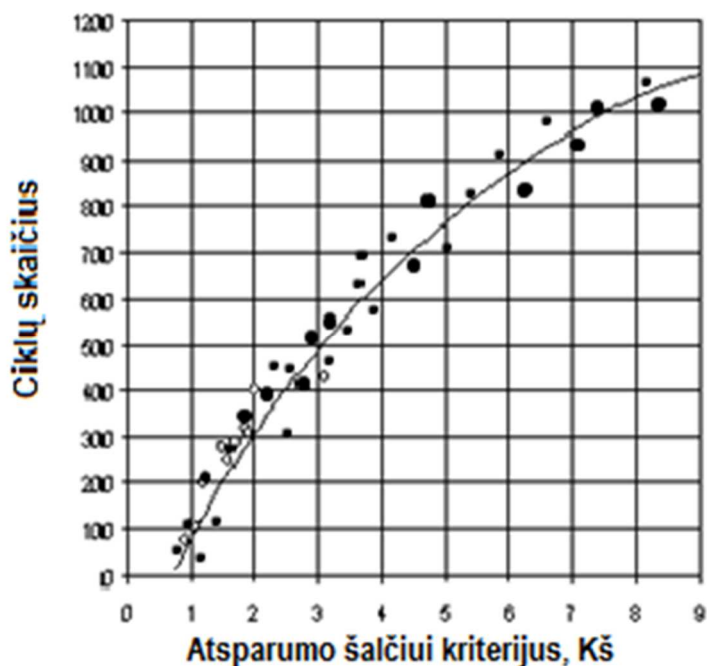
čia:  $P_u$  - uždaras betono poringumas (įtrauktas oras betono mišinyje ir kontrakcinės poros);

$P_a$  - atviras integralinis betono poringumas (kapiliarinės poros);

$P_u$  - kurio apytiksli reikšmė lygi oro kiekiui betono mišinyje ir  $P_a$ , randami eksperimentiškai pagal GOST 12730.0-12730.5 pateiktas metodikas.

Pagal šį kriterijų, atsparus šalčiui betonas bus tas, kuriame rezervinių porų tūris bus didesnis už vandens, esančio betono porose, tūrio prieaugį, virstant jam ledu.

Bendra aukščiau aprašytos priklausomybės išraiška pateikiama 29 pav.



**29 pav.** Betono atsparumo šalčiui priklausomybės grafikas nuo atsparumo šalčiui kriterijaus  $K_s$

Kaip matome 29 pav., betono atsparumą šalčiui tiesiogiai įtakoja V/C. V/C sukuria atvirąjį poringumą, o uždaras poringumas atitinka oro kiekį betono mišinyje.

Betono poringumo bandymas buvo atliktas atrinktiems bandiniams iš 6-9 betonų variantų, kurie kietėjo vandens vonelėje 28 p.



**6 lentelė.** Betono poringumo parametrai

Nr.	Išdžiovinto betono tankis, kg/m <sup>3</sup>	Tūrinis vandens įgėris, %	Bendras poringumas, %	Atviras poringumas, %	Uždaras poringumas, %	Atsparumo šalčiui kriterijus, K <sub>s</sub>
6.1	2269	9,30	17,33	9,3	8,03	9,60
6.2	2178	10,79	19,88	10,79	9,09	9,35
7.1	2132	11,19	19,98	11,19	8,80	8,73
7.2	2173	11,11	18,38	11,11	7,26	7,26
8.1	2219	11,07	18,67	11,07	7,61	7,64
8.2	2157	11,29	19,92	11,29	8,63	8,50
9.1	2151	12,62	20,71	12,62	8,10	7,13
9.2	2114	12,83	21,40	12,83	8,57	7,42

Kadangi gauname K<sub>s</sub> reikšmę virš 9 betonuose, kur nepridėjome ŠMS, galima kelti hipotezę, kad toks betonas galės atlaikyti virš 1050 šaldymo-atšildymo ciklą. Betonas su 30 % ŠMS turi mažesnes reikšmes 7,13 ir 7,42, tai toks betonas turėtų atlaikyti virš 950 šaldymo-atšildymo ciklą. 9 var. betonas turi mažesnę reikšmę nei 6 var. betonas, nes turi didesnę atvirą poringumą, kuris susidaro, kai vanduo išeina iš betono masės. Atviras poringumas galėjo padidėti, dėl ŠMS esančio elementinio aliuminio, kuris tirpdamas šarminėje betono aplinkoje išskiria vandenilio dujas, kurios padidina atvirą poringumą ar net išpučia betoną, nes pucolanai turėtų sumažinti atvirą poringumą formuodami antrinį C-S-H sluoksnį.

#### 2.4.4. Betono atsparumo šalčiui nustatymas

Betono atsparumas šalčiui vertinamas pagal CEN/TS 12390-9:2016 „Testing hardened concrete. De-icing salts were used to test the freeze–thaw resistance“ [43]. Išrinktų vizualiai geriausiai atrodančių betono bandinių svoris nustatytas kalibruotomis svarstyklėmis. Pasverti betono gaminiai patalpinti į indą, kur buvo apsemti 1/3 savojo aukščio 3 % NaCl vandeniniu tirpalu. Dažniausiai atliekami 28 šaldymo ir atšildymo ciklai stebint, ar neatsiranda vizualinių destruktivių procesų ir masės nuostolių. Kadangi šaldymo ir atšildymo įrenginys atlikdavo vieną ciklą per parą, tai bandinių būseną buvo stebima kas kelias dienas, nes po pirmų 4-ių ciklų nesimatė jokių betono struktūrinių pažeidimų – neatsivėrė plyšiai ir išliko betono gaminio vientisa struktūra (žr. 30 ir 31 pav.). Po 13 šildymo ir atšaldymo ciklų buvo galima pamatyti menką 1 var. vieno iš trijų bandinių atsikišusios betoninės dalies nutrupėjimą, tačiau pagrindinė bandinio dalis atrodė nepažeista (žr. 32 pav.). Likę bandiniai nepakito. P 21 ciklo pastebėta, kad 1, 2 ir 4 variantų atsikišusios dalys nutrupėjo: 1 var. visiškai, o 2 ir 4 var., kur malto stiklo yra po 10 %, nežymiai. 3 ir 5 varianto bandiniai atrodo visiškai nepažeisti (žr. 33 pav.). Po 28 ciklų 1 var. bandinių visas paviršius pradėjo trupėti iki 1 mm storio (žr. 34, 35 pav.). 3 ir 5 var. bandinių su 15 % maltu stiklu atsikišę paviršiai pradėjo trupėti, tačiau pagrindinė dalis nepažeista (žr. 35 pav.). Likę bandiniai išlieka nepakitę. Po 37 ciklų nežymūs 2, 3, 4, ir 5 variantų pakitimai. 1 var. bandinių paviršiai trupa – po apžiūros jaučiamos smulkios užpildo dalelės tarp pirštų (žr. 36 pav.). Po 45 šaldymo-atšildymo ciklų bandymas nutraukiamas. Bandinių vizualinė išvaizda,

užbaigus bandymą, matoma 37 pav. 1 var. bandinių paviršiai smarkiai suirę – giliau kaip 1 mm. 2 var. bandinių su 10 % švriu maltu stiklu paviršiai žymiai aptrupėję atskirais plotais Bandiniai su 15 % švriu maltu stiklu (3 var.) paviršiai nepažeisti, išskyrus atsikišusias aptrupėjusias dalis. Su 10 % UMS bandiniai (4 var.) yra su atskirais aptrupėjusiais plotais, mažesniais nei 2 var. Bandiniai su 15 % UMS (5 var.) paviršiai nepažeisti, nežymiai aptrupėjusios atsikišusios batono dalys.



30 pav. Betonų atsparumo šalčiui nustatymas po 0 ciklų



31 pav. Betonų atsparumo šalčiui nustatymas po 4 ciklų



32 pav. Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 13 ciklų



33 pav. Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 21 ciklų



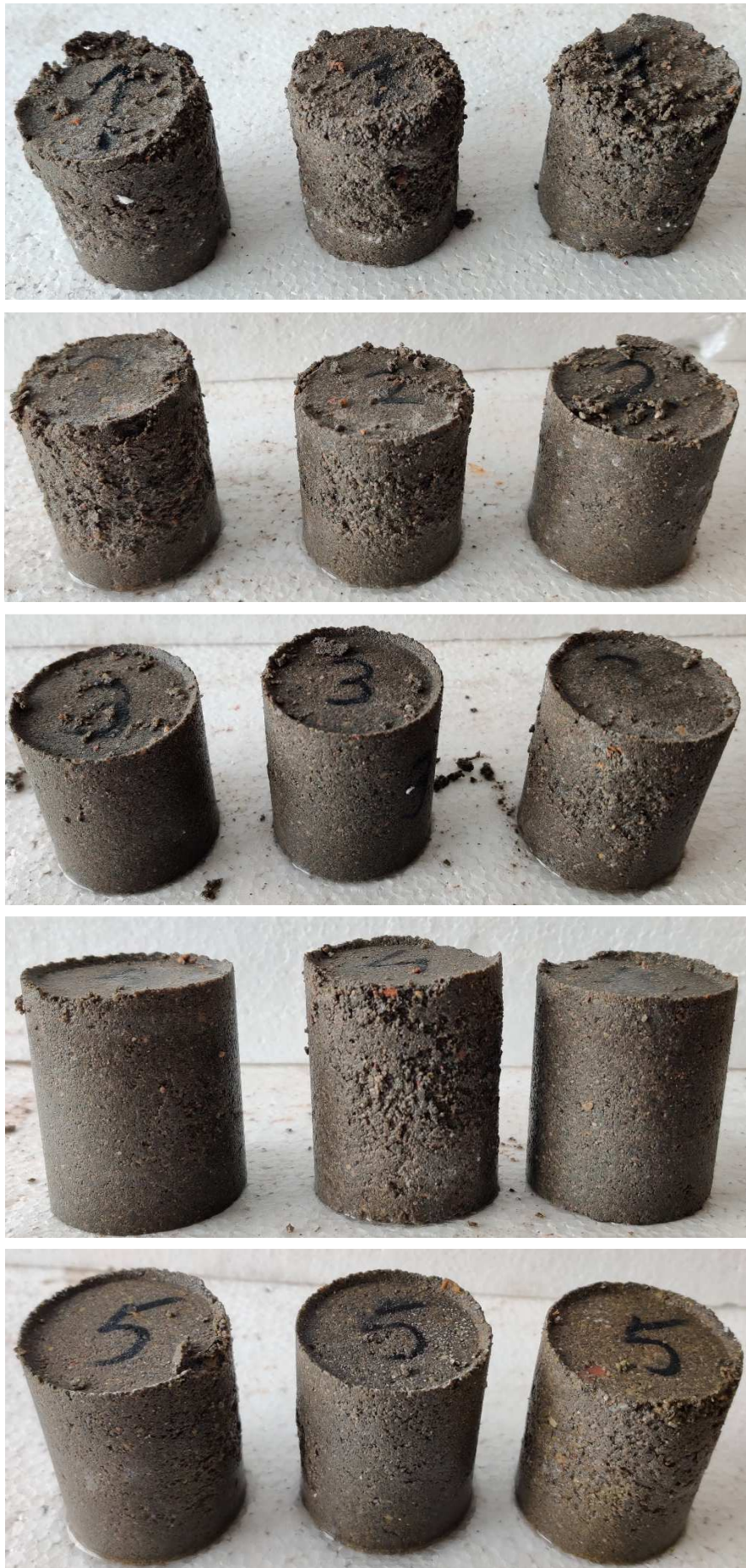
34 pav. Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 28 ciklų



35 pav. Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 28 ciklų. 1 ir 5 var.



36 pav. Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 37 ciklų



37 pav. Betono atsparumo šalčiui nustatymas po 45 ciklų. Bandymas nutraukiamas

Betonas, atlaikęs 45 šaldymo-atšildymo ciklus buvo mažai pažeistas. Tačiau betonai su smulkiu užpildu pasižymi šia savybe. Bandiniai su didesniu maltu stiklo kiekiu pasirodė geriausiai. Iš vizualinės bandinių apžiūros, darau išvadą, kad užterštas maltas stiklas pagerina betono atsparumą šalčiui labiau, nei švarus maltas stiklas.

Atliktas alternatyvus atsparumo šalčio poveikiui bandymas 6-9 betonų variantams (žr. 17 pav.), buvo gauti rezultatai. Betono bandinių bendras vaizdas po 28 šaldymo-atšildymo ciklų (žr. pav. 39). Prieš šaldymo ciklus bandiniai neturėjo pažeidimų (žr. pav. 38).

Čia bandinių numeracija atitinka taip: 1-6, 2-7, 3-8, 4-9 betonų variantus pateiktus 2 ir 3 lentelėse (atitinkamai: be stiklo, 10 % ŠMS, 20 % ŠMS, 30 % ŠMS).



38 pav. Bandiniai prieš šalčio bandymą



39 pav. Bendras bandinių vaizdas po 28 šaldymo-atšildymo ciklų



**40 pav.** Atrinkti prasčiausiai atrodantys bandiniai po 28 ciklų

Iš 39 pav. galima matyti, kad bandiniai nėra stipriai apirę, tik atrinkus labiausiai pažeistus (žr. 40 pav.) galima pastebėti bandinių paviršiuose esančius pažeidimus. Pažeidimai nėra gilūs, tik paviršutiniški, siekiantys iki 1 mm gylį. 1, 2 ir 4 bandinių variantų pažeidimai yra apytikriai toje pačioje vietoje – šonuose. Jie pirmieji pasimatė. Taip galėjo įvykti, dėl bandinių formoje esančių paviršiaus nelygumų. 3 bandinio variantas turi pažeidimus viršutinėje krašto dalyje. Bandinys be malto stiklo (t. y. 1 var.) turi giliausius pažeidimus, 2-3 užpildo dalelių skersmenų, o bandiniai su maltu stiklu turi negilius, vos 1 užpildo dalelės skersmens pažeidimus.

Iš betono poringumo parametrų, buvo galima matyti, kad betono bandiniai bus atsparūs šaldymo-atšildymo ciklams, tačiau atsparumo šalčiui kriterijaus,  $K_s$ , reikšmę didžiausią turėjo 1 varianto bandiniai, kuriame nėra malto stiklo.  $K_s$  reikšmės mažėjo, su vis didėjančiu malto stiklo kiekiu bandinių variantuose. Iš 40 pav. matome, kad 1 var. bandinys yra labiausiai pažeistas, o likę bandinių variantai 2 (su 10 % ŠMS), 3 (su 20 % ŠMS) ir 4 (su 30 % ŠMS) atrodo vienodai giliai pažeisti. Darau išvadą, kad maltas stiklas pagerina betono šalčio atsparumą.

2, 3 ir 4 bandinių variantai mažiau pažeisti, kaip 1 varianto bandiniai, dėl didesnio atvirojo poringumo, vanduo turėjo kur plėstis stingdamas. Taip pat, dėl antrinės hidratacijos tarp kalcio hidroksido ir silicio susidariusio C-S-H, kuris formuojasi, kai yra aukštas pH, sumažėjus silicio oksido ir kalcio hidroksido koncentracijai betone, NaCl vandeninis tirpalas buvo mažiau chemiškai agresyvus bandiniams.

## **2.5. Tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM)**

Švarus maltas stiklas ir užterštas maltas stiklas buvo analizuojami skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM angl. Scanning Electron Microscope) FEI Quanta 200 FEG (žr. 41 pav.). FEI Quanta 200 FEG - aukštą skiriamąją gebą turintis skenuojantis elektroninis mikroskopas su integruota Šotki tipo elektronų patranka. SEM - įrankis, skirtas tūkstančius kartų priartinti kietojo kūno paviršių. SEM pagalba gauti vaizdai yra žymiai didesnės skiriamosios gebos bei raiškos, lyginant su optinių mikroskopų gaunamais vaizdais. Ypač jautriais detektoriais „pajaučiant“ charakteringus rentgeno

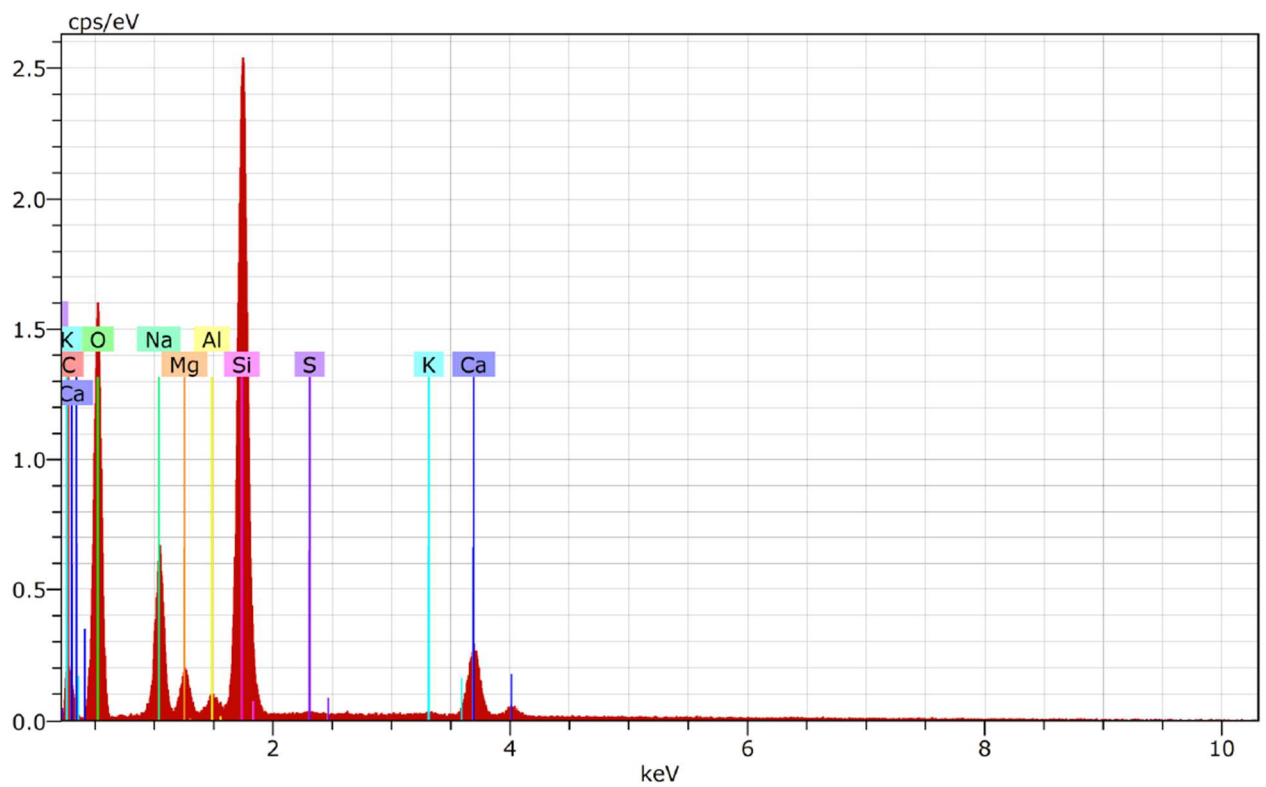
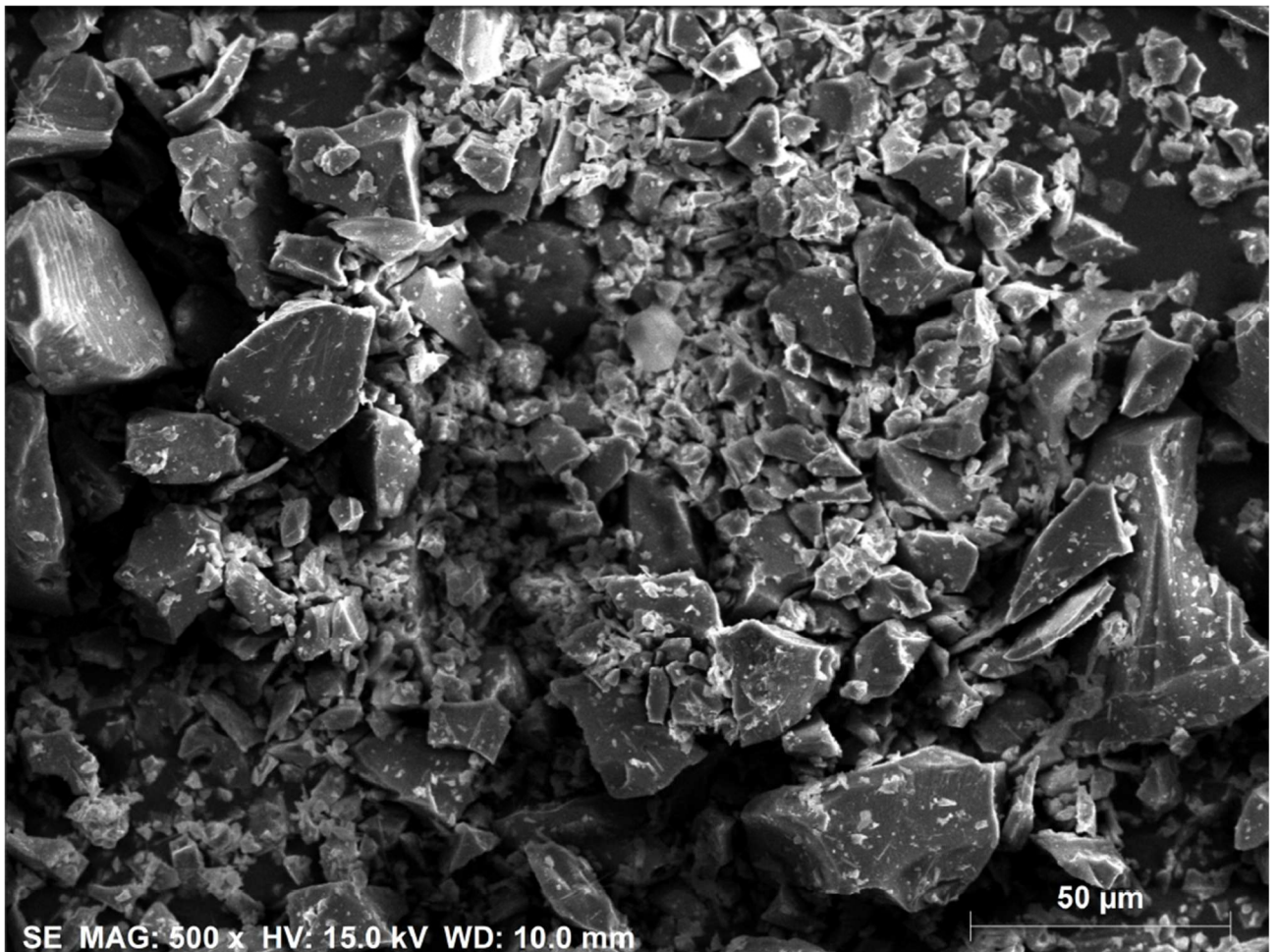


spindulius galima gauti medžiagos cheminę analizę. Jeigu atliekamas elektronų spindulio skenavimas vyksta išilgai bandinio, ekrane parodoma rentgeno spindulių intensyvumo pasiskirstymas, kuris vaizduoja atominių (grynųjų) cheminių elementų pasiskirstymą.

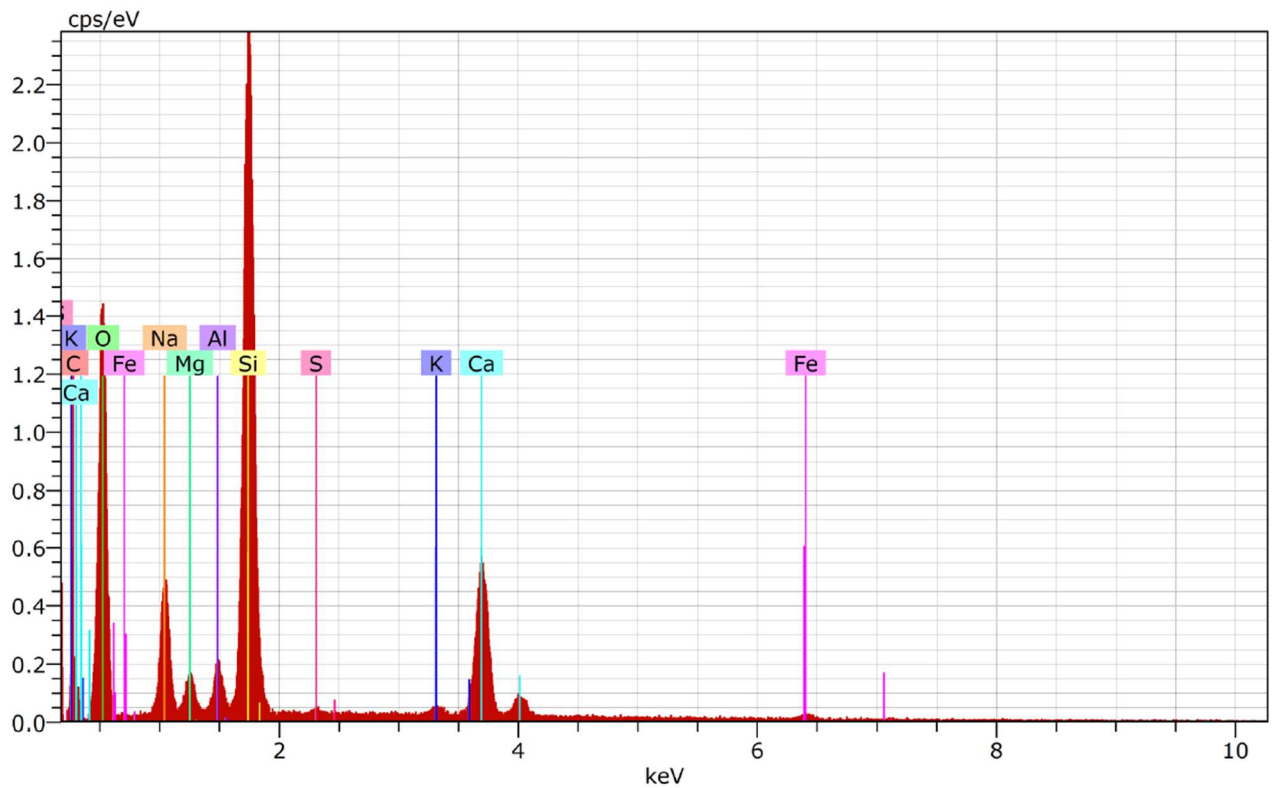
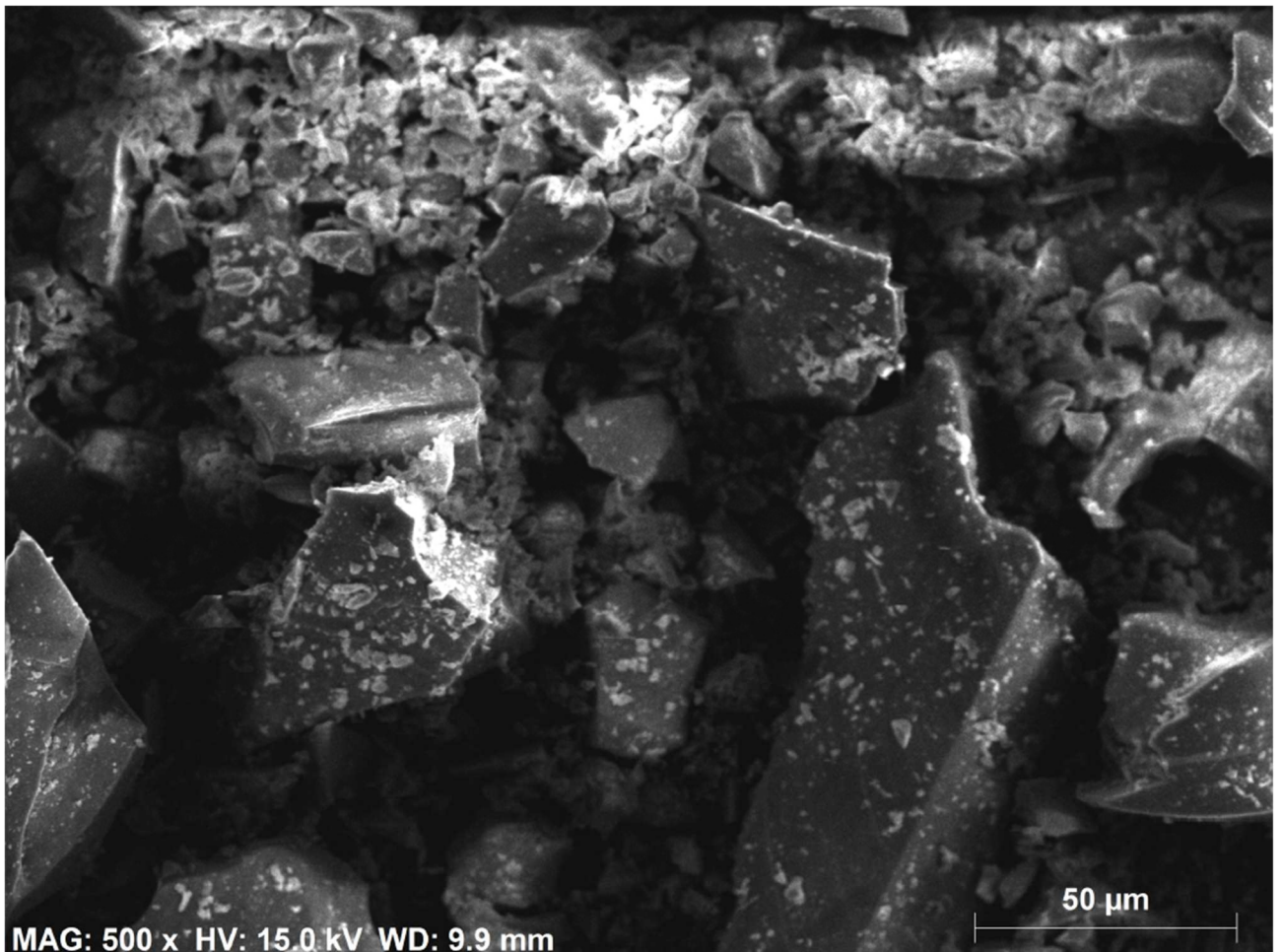


**41 pav.** Skenuojantis elektronų mikroskopas „FEI Quanta 200 FEG”

Skenavimui buvo parinktas švarus maltas stiklas ir užterštas maltas stiklas. Šiuo elektronų mikroskopu galima nustatyti tiriamojo bandinio cheminę sudėtį, kristalografinę orientaciją (žr. 42 ir 43 pav.). Pilnas bandinio fragmento vaizdas gaunamas, sufokusavus elektronų pluoštą ir jį skenuojant mikroskopo viduje esančio bandinio paviršių. Tiriant rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrus (EDS) buvo įvertinta elementinė bandinių sudėtis (žr. 42 ir 43 pav.).



42 pav. Švaraus malto stiklo skenuojančio elektroninio mikroskopo ir elementinės analizės rezultatai



**43 pav.** Užteršto malto stiklo skenuojančio elektroninio mikroskopo ir elementinės analizės rezultatai

Priartintuose ŠMS ir UMS fragmentų vaizduose matome panašias aštrias briaunas turinčias daleles, jos yra įvairių dydžių, labiausiai tikėtina, kad jos susidarė malant stiklo duženas rutuliniu malūnu.

Išskirtinų žemės dulkių, smėlio kruopelių ar kitų užterštumo požymių SEM negali parodyti, todėl buvo pasinaudota rentgeno spindulių energijos dispersijos spektras ir įvertinta ŠMS ir UMS elementinė cheminė sudėtis. Ir ŠMS, ir UMS buvo aptikti panašūs elementai: deguonis (O), silicis (Si), anglis (C), natriis (Na), kalcis (Ca), magnis (Mg), aliuminis (Al), kalis (K) ir siera (S). Išskirtiniausias elementas yra anglis. Kadangi stiklo gamyboje jis nebūna plačiai naudojamas, nebent kaip kuras, ir pagrinde sudaro organines medžiagas – teršalus – betono gamyboje, jis kelia susirūpinimą, tačiau anglimi yra padengiamas padėklas, ant kurio būna padedamas bandinys, todėl pasakyti ar gautas anglies kiekis yra iš teršalų ar nuo padėklo yra sudėtinga. Deguonis dažniausias aptinkamas elementas junginiuose, kaip oksidai. Silicis – pagrindinė stiklo sudedamoji. Natriis, kalis ir kalcis dažnai naudojami stiklo gamyboje. Kalcis – pagrindinis elementas, kuris sudarydamas junginius Ca-Si-OH ir Ca(OH)<sub>2</sub> suteikia CEM I portlandcemenčiui betonui laikomąją galią. Šarmai kaip kalis ir natriis yra chemiškai aktyvesni elementai už kalcį, todėl jį gali išstumti iš sudarytų patvarių junginių ir sudaryti naujus junginius, kaip skystą stiklą, kuris gali ir teigiamai, ir neigiamai (kai jo per daug) veikti betoną. Aliuminis gali būti elementinis, nuo skardinių ir panašių šiukšlių, tokiu atveju, šarminė aplinkoje aliuminis tirpsta ir išskiria vandenilio dujas, kurios gali sukelti atvirą poringumą ar net išpūsti betoną. Aliuminis taip pat randamas portlandcemenčio sudėtyje, tačiau, kadangi jis būna C3A pavidale, o C3A labai greitai hidratuojasi ir kietėja, tai reikalinga sieros junginys (gipsas), kuris reaguodamas su C3A ir vandeniu sudaro etringitą ir pristabdo betono tešlos staigų kietėjimą.

## Išvados

1. Maltos stiklo atliekos nėra tiek pat veiksmingos, kaip  $\text{SiO}_2$  dulkės, tačiau vis tiek teigiamai įtakoja betono gniuždymo stiprį ir atsparumą šaldymo-atšildymo ciklams. Sumaltas stiklo duženas, gautas iš komunalinių atliekų perdirbimo srauto, galima panaudoti kaip betono mineralinį priedą pakeičiant užpildą maltu stiklu. Optimaliausias malto stiklo kiekis yra 20 % nuo cemento masės. Silicio dioksidas reaguoja su betone esančiais šarmais ir sudaro pucolaninius junginius, taip pagerindamas betono gniuždymo stiprį. Kadangi betonas su 20 % švarius maltu stiklu parodė didesnę gniuždymo stiprį, nei betonas be švaraus malto stiklo, reikia atlikti papildomus bandymus pakeičiant portlandcementį į švarų maltą stiklą, o ne užpildą.
2. Organinėmis medžiagomis užteršto malto stiklo poveikis betono gniuždymo stipriui yra panašus, kaip ir švaraus malto stiklo. Po hidroterminio apdorojimo betonas su 10 % švarius maltu stiklu turi 3 % didesnę gniuždymo stiprį nei betonas su 10 % užterštu maltu stiklu. Papildomas atliekų valymas nėra privalomas (lyginant su švarius maltu stiklu) norint pasiekti panašų poveikį betonui.
3. Betono su maltu stiklu atsparumas šalčiui yra padidėjęs ir galima pastebėti skirtumą po 28 šaldymo-atšildymo ciklų. Betonų su užterštu maltu stiklu atsparumas šaldymo-atšildymo ciklams yra panašus į betonų su švarius maltu stiklu. Po 45 šaldymo-atšildymo ciklų 15 % malto stiklo turintis betonas geriau atlaiko šaldymo-atšildymo ciklus, nei betonas turintis 10 % malto stiklo.
4. Kadangi didelė dalis atrūšiuotų stiklo atliekų nėra perdirbama, tai jų panaudojimas betono gamyboje yra labai naudingas. Norint pagaminti  $1 \text{ m}^3$  betono su 20 % maltu stiklu vietoje užpildo, būtų galima sunaudoti net 96 kg stiklo atliekų, kurios paprastai atsidurtų šiukšlyne.

## Literatūros sąrašas

1. PARIS, J. M. ir C. C. FERARO. Evaluation of Particle Effects in Portland Cement Systems. *Journal of Materials in Civil Engineering* [interaktyvus]. 2018, 30(9) [žiūrėta 2020-04-29]. ISSN 1943-5533. Prieiga per:  
[https://scholar.google.com/scholar?hl=lt&as\\_sdt=0%2C5&q=Evaluation+of+Particle+Effects+in+Portland+Cement+Systems&btnG=](https://scholar.google.com/scholar?hl=lt&as_sdt=0%2C5&q=Evaluation+of+Particle+Effects+in+Portland+Cement+Systems&btnG=)
2. ŠRATC: Šiaulių regiono atliekų tvarkymo centras [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per:  
<http://www.sratc.lt/stiklo-atliekos/>
3. EPA: United States Environmental Protection Agency [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2020-03-28]. Prieiga per:  
<https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/glass-material-specific-data>
4. *Visuotinė lietuvių enciklopedija* T. XXII (Sko–Šala). Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas, 2012. ISBN 9785420017333.
5. NAUJOKAITIS, Algimantas Pranas. *Statybinės medžiagos. Betonai*. Vilnius: Technika, 2007. ISBN 9789955282099.
6. RUTKAUSKAS, Aurimas. *Mineralinių priedų poveikis betono atsparumui šarminei korozijai: Daktaro disertacija* [interaktyvus]. VGTU, 2018 [žiūrėta 2020-05-03]. Prieiga per:  
<http://dspace.vgtu.lt/bitstream/1/3742/1/A.%20RUTKAUSKAS%20DISERTACIJA%202018%2011%2009%20GALUTINE.pdf>
7. VALSTYBINĖ DARBO INSPEKCIJA PRIE SOCIALINĖS APSAUGOS IR DARBO MINISTERIJOS. *Faktai silicio dioksidas* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2020-03-28]. Prieiga per:  
<https://www.vdi.lt/AtmUploads/SILICA%20DUST%20LTU.pdf>
8. CORNING MUSEUM of GLASS. *Types of glass* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per:  
<https://www.cmog.org/article/types-glass>
9. ZHENG, K. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali–silica reaction. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. 2016, 67, 30-38 [žiūrėta 2020-04-29]. ISSN 0958-9465. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008>
10. MEHTA, P.K. ir P.J.M. MONTEIRO. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3-oji laida. McGraw-Hill Education, 2006. ISBN 0071462899.

11. PARIS, J., et al. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2016, 121, 1-18 [žiūrėta 2020-05-02]. ISSN 0959-6526. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>
12. ZHENG, K. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. 2016, 67, 30-38 [žiūrėta 2020-05-02]. ISSN 0958-9465. Prieiga per:  
<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0958946515300640?via%3Dihub>
13. JIAN-XIN, L., et al. Co-Utilization of Waste Glass Cullet and Glass Powder in Precast Concrete Products. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 223, 210-20 [žiūrėta 2020-05-03]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.231>
14. RUTKAUSKAS, Aurimas. *Mineralinių priedų poveikis betono atsparumui šarminėi korozijai: Daktaro disertacija* [interaktyvus]. VGTU, 2018 [žiūrėta 2020-05-12]. ISBN 978-609-476-136-2. Prieiga per:  
<http://dspace.vgtu.lt/handle/1/3742>
15. BUENO, E., et al. A review of ground waste glass as a supplementary cementitious material: A focus on alkali-silica reaction. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2020, 257, [žiūrėta 2020-05-12]. ISSN 0959-6526. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120180>
16. BOSTANCI, S. Use of waste marble dust and recycled glass for sustainable concrete production. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2020, 251, [žiūrėta 2020-05-12]. ISSN 0959-6526. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119785>
17. TAMANA, Nafisa, et al. Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 239, [žiūrėta 2020-05-13]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>
18. SONG, W., et al. Effects of recycled CRT glass fine aggregate size and content on mechanical and damping properties of concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 202, 332-340, [žiūrėta 2020-05-13]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.033>
19. YANG, S., et al. Influence of particle size of glass aggregates on the high temperature properties of dry-mix concrete blocks. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 209, 522-531, [žiūrėta 2020-05-13]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.131>

20. BISHT, K., et al. Gainful utilization of waste glass for production of sulphuric acid resistance concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 235, [žiūrėta 2020-05-13]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117486>

21. ARABI, N., et al. Valorization of recycled materials in development of self-compacting concrete: Mixing recycled concrete aggregates – Windshield waste glass aggregates. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 209, 364-376, [žiūrėta 2020-05-15]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.024>

22. LEE, H., et al. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2018, 170, 683-693, [žiūrėta 2020-05-15]. ISSN 0959-6526. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.133>

23. GONG, J., ir W. ZHANG. The effects of pozzolanic powder on foam concrete pore structure and frost resistance. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 208, 135-143, [žiūrėta 2020-05-15]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.021>

24. ASEEL, B. AL-Zubaid, Shabeeb. Study The Effect of Recycled Glass on The Mechanical Properties of Green Concrete. *Energy Procedia* [interaktyvus]. 2017, 119, 680-692, [žiūrėta 2020-05-15]. DOI 10.1016/j.egypro.2017.07.095. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.095>

25. POON, C. ir L. C. SING. The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. 2008, 30(4), 283-289, [žiūrėta 2020-05-15]. ISSN 0958-9465. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.10.005>

26. TURGUT, P. ir E. S. YAHLIZADE. (2009). Research Into Concrete Blocks With Waste Glass [interaktyvus]. 2009, [žiūrėta 2020-05-15]. DOI 10.5281/zenodo.1062165. Prieiga per:

[https://zenodo.org/record/1062166#.X\\_YeT9j7SMo](https://zenodo.org/record/1062166#.X_YeT9j7SMo)

27. LING, T., ir C. POON. Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2014, 68, 209-215, [žiūrėta 2020-05-16]. ISSN 0959-6526. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.084>



28. LEE, G., et al. Effects of recycled fine glass aggregates on the properties of dry-mixed concrete blocks. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2013, 38, 638-643, [žiūrėta 2020-05-16]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.017>
29. POON, C., E. CHEUNG. NO removal efficiency of photocatalytic paving blocks prepared with recycled materials. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2007, 21(8), 1746-1753, [žiūrėta 2020-05-16]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.018>
30. YANG, Shuqing, Hongzhi CUI, Chi Sun POON. Assessment of in-situ alkali-silica reaction (ASR) development of glass aggregate concrete prepared with dry-mix and conventional wet-mix methods by X-ray computed micro-tomography. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. 2018, 90, 266-276, [žiūrėta 2020-05-16]. ISSN 0958-9465. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.027>
31. LAM, C., et al. Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass-ASR consideration. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. 2007, 29, pp. 616-625, [žiūrėta 2020-05-17]. ISSN 0958-9465. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.008>
32. *Environmental Protection Department, the Government of the Hong Kong Special Administrative Region* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-05-17]. Prieiga per:  
[https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/waste/waste\\_maincontent.html](https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/waste/waste_maincontent.html)
33. CORINALDESI, V., et al. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management* [interaktyvus]. 2005, 25(2), 197-201, [žiūrėta 2020-05-19]. ISSN 0956-053X. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.009>
34. PARK, S., ir B. LEE (2004). Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. *Cement and Concrete Research* [interaktyvus]. 2004, 34(7), 1145-1152, [žiūrėta 2020-05-19]. ISSN 0008-8846. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.005>
35. TOPCU, I. B., ir M. CANBAZ (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research* [interaktyvus]. 2004, 34(2), 267-274, [žiūrėta 2020-05-19]. ISSN 0008-8846. Prieiga per:  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003>
36. PARK, S., et al. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research* [interaktyvus]. 2004, 34(12), 2181-2189, [žiūrėta 2020-05-19]. ISSN 0008-8846. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.006>

37. ISLAM, G., et al. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment* [interaktyvus]. 2017, 6(1), 37-44, [žiūrėta 2020-05-19]. ISSN 2212-6090. Prieiga per:

[https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN\\_elsevier\\_sdoi\\_10\\_1016\\_j\\_ijsbe\\_2016\\_10\\_005&context=PC&vid=KTU&lang=lt\\_LT&search\\_scope=KTU&adaptor=primo\\_central\\_multiple\\_fe&tab=default\\_tab&query=any,contains,Waste%20glass%20powder%20as%20partial%20replacement%20of%20cement%20for%20sustainable%20concrete%20practice&offset=0&pcAvailability=false](https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_elsevier_sdoi_10_1016_j_ijsbe_2016_10_005&context=PC&vid=KTU&lang=lt_LT&search_scope=KTU&adaptor=primo_central_multiple_fe&tab=default_tab&query=any,contains,Waste%20glass%20powder%20as%20partial%20replacement%20of%20cement%20for%20sustainable%20concrete%20practice&offset=0&pcAvailability=false)

38. TONIOLO, N., et al. Extensive reuse of soda-lime waste glass in fly ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2018, 188, 1077-1084, [žiūrėta 2020-05-19]. ISSN 0950-0618. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.096>

39. AVANCINI, T., et al. Magnetic properties of magnetite-based nano-glass-ceramics obtained from a Fe-rich scale and borosilicate glass wastes. *Ceramics International* [interaktyvus]. 2019, 45(4), 4360-4367, [žiūrėta 2020-05-19]. ISSN 0272-8842. Prieiga per:

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.111>

40. SHOOK, William E., Leonard W. BELL. Corrosion control in concrete pipe and manholes. *Con Shield Technologies* [interaktyvus]. 1998 [žiūrėta 2020-05-19]. Prieiga per:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.500.7182&rep=rep1&type=pdf>

41. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 196-6:2019, *Cemento bandymų metodai. 6 dalis. Smulkumo nustatymas* [interaktyvus]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019 [žiūrėta 2020-09-12]. Prieiga per:

[https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=EBK02EBK02-000052239&context=L&vid=KTU&lang=lt\\_LT&search\\_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default\\_tab&query=any,contains,Cemento%20bandym%C5%B3%20metodai&offset=0&pcAvailability=false](https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=EBK02EBK02-000052239&context=L&vid=KTU&lang=lt_LT&search_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default_tab&query=any,contains,Cemento%20bandym%C5%B3%20metodai&offset=0&pcAvailability=false)

42. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-3:2019 *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris* [interaktyvus]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019 [žiūrėta 2020-09-12]. Prieiga per:

[https://view.elaba.lt/standartai/view?search\\_from=aleph&id=1328056](https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=aleph&id=1328056)

43. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. CEN/TS 12390-9:2016 *Testing hardened concrete. De-icing salts were used to test the freeze-thaw resistance* [interaktyvus]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016 [žiūrėta 2020-06-07]. Prieiga per:

[https://infostore.saiglobal.com/preview/256773925953.pdf?sku=880176\\_SAIG\\_NSAI\\_NSAI\\_2091156](https://infostore.saiglobal.com/preview/256773925953.pdf?sku=880176_SAIG_NSAI_NSAI_2091156)

44. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 206:2013+A1:2017 *Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis* [interaktyvus]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017 [žiūrėta 2020-06-04]. Prieiga per:

[https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=EBK02EBK02-000028979&context=L&vid=KTU&lang=lt\\_LT&search\\_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default\\_tab&query=any,contains,Betonas.%20Specifikacija,%20eksploatacin%C4%97s%20savyb%C4%97s,%20gamyba%20ir%20atitiktis&offset=0&pcAvailability=false](https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=EBK02EBK02-000028979&context=L&vid=KTU&lang=lt_LT&search_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default_tab&query=any,contains,Betonas.%20Specifikacija,%20eksploatacin%C4%97s%20savyb%C4%97s,%20gamyba%20ir%20atitiktis&offset=0&pcAvailability=false)

45. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-7:2019 *Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis* [interaktyvus]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020 [žiūrėta 2020-06-02]. Prieiga per:

[https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=EBK02EBK02-000053918&context=L&vid=KTU&lang=lt\\_LT&search\\_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default\\_tab&query=any,contains,Sukiet%C4%97jusio%20betono%20bandymai.%207%20dalis.%20Sukiet%C4%97jusio%20betono%20tankis&offset=0&pcAvailability=false](https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=EBK02EBK02-000053918&context=L&vid=KTU&lang=lt_LT&search_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default_tab&query=any,contains,Sukiet%C4%97jusio%20betono%20bandymai.%207%20dalis.%20Sukiet%C4%97jusio%20betono%20tankis&offset=0&pcAvailability=false)