



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Padangų polimerinio pluošto panaudojimas cementinėse sistemose**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Martynas Čyžius**

Projekto autorius

**Prof. dr. Danutė Vaičiukynienė**

Vadovė

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Padangų polimerinio pluošto panaudojimas cementinėse sistemose**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Martynas Čyžius**

Projekto autorius

**Prof. dr. Danutė Vaičiukynienė**

Vadovė

**Doc. Rėda Bistrickaitė**

Recenzentas / Recenzentė

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Martynas Čyžius

## **Padangų polimerinio pluošto panaudojimas cementinėse sistemose**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Martynas Čyžius

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



Čyžius, Martynas. Padangų polimerinio pluošto panaudojimas cementinėse sistemose. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Danutė Vaičiukynienė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Statybos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: padangų polimerinis pluoštas, kompozicinė medžiaga

Kaunas, 2023. 41 p.

### **Santrauka**

Atliekant magistrinį baigiamąjį darbą buvo nagrinėjamas padangų polimerinio pluošto panaudojimas cementinėse sistemose. Rengiant baigiamąjį darbą buvo išnagrinėta 40 literatūros šaltinių, darbe yra panaudotos 6 lentelės ir 14 paveikslų. Buvo formuojami skirtingų santykių kompozitiniai bandiniai, kuriuos sudarė įprastinis portlandcementis ir polimerinis pluoštas, bei aplinkai draugiškas rišiklis ir polimerinis pluoštas. Bandiniai buvo pagaminti naudojant portlandcementį CEM I 42,5 R. Aplinkai draugiškas rišiklis buvo gautas sutaupant cemento akmenį, pakeičiant jį pucolaniniais priedais, bei įterpiant greitiklį – natrio sulfatą. Buvo nustatoma optimaliausia aplinkai draugiško rišiklio sudėtis. Nustatyta rišiklio sudėtis buvo: 80 proc. portlandcemenčio, 20 proc. pucolaninių priedų ir 0,25 proc. natrio sulfato nuo visos pradinių medžiagų masės. Šios sudėties rišiklio stiprumas išaugo +13,60 proc. lyginant su kontroliniais bandiniais. Bandiniai buvo analizuojami atsižvelgiant į: kompozitinių bandinių tankį, kuris svyravo nuo 343 iki 1044 kg/m<sup>3</sup>, sąlygines šilumos laidumo reikšmes, medžiagos stiprumą ir kitas charakteristikas. Taip pat eksperimentų metu buvo nustatyta. Bandiniai taip pat buvo ištirti ir atsižvelgiant į jų stiprumą. Įprastinių bandinių, kurių stiprumą pavyko nustatyti, stiprių reikšmės buvo 0,024 MPa ; 0,064 MPa ; 0,103 MPa. O bandinių su aplinkai draugišku rišikliu, analogiškai : 0,102 MPa; 0,199 MPa ; 0,516 MPa. Taigi buvo galima pastebėti, kad bandiniai su aplinkai draugišku rišikliu pasižymėjo didesniu stiprumu.

Čyžius, Martynas. Use of Waste Tyre Fibers in the Cement Systems. Master's Final Degree Project / supervisor prof. Danutė Vaičiukynienė; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Civil engineering

Keywords: tire polymer fiber, composite material

Kaunas, 2023. 41 pages.

### **Summary**

The use of tire polymer fiber in cement systems was examined in the master thesis. During the preparation of the thesis, 40 literature sources were analyzed, 6 tables and 14 figures are used in the work. Composite specimens of different ratios were formed, consisting of conventional Portland cement and polymer fiber, as well as environmentally friendly binder and polymer fiber. The samples were made using Portland cement CEM I 42.5 R. An environmentally friendly binder was obtained by saving cement stone, replacing it with pozzolanic additives, and adding an accelerator - sodium sulfate. The most optimal composition of the environmentally friendly binder was determined. The determined composition of the binder was: 80 percent. Portland cement, 20 percent. pozzolanic additives and 0.25 percent. of sodium sulfate from the total weight of the starting materials. The binder strength of this composition increased by +13,60 percent. compared to controls. The samples were analyzed in terms of: density of the composite samples, which ranged from 343 to 1044 kg/m<sup>3</sup>, conditional thermal conductivity values, material strength, and other characteristics. It was also found during the experiments. The specimens were also examined for their strength. The strength values of the normal specimens whose strength was determined were 0,024 MPa; 0,064 MPa; 0,103 MPa. And for samples with an environmentally friendly binder, analogously: 0,102 MPa; 0,199 MPa; 0,516 MPa. Thus, it could be observed that the samples with environmentally friendly binder had higher strength.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>12</b>
1.1. Temos aktualumas .....	12
1.2. Smulkintų guminių padangų utilizavimo galimybės cementiniuose kompozituose .....	12
1.3. Padangų gumos atliekų utilizavimas asfalto gamyboje.....	15
1.4. Perdirbtų padangų polimerinių pluoštų įtaka betono savybėms.....	16
<b>2. Tyrimų metodologija.....</b>	<b>21</b>
2.1. Tyrimo metodai.....	21
2.2. Naudotos pradinės medžiagos.....	22
<b>3. Rezultatai ir diskusija .....</b>	<b>26</b>
3.1. Padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitiniai bandiniai.....	26
3.2. Kompozitinių bandinių rišiklių tyrimas naudojant cemento pakaitines medžiagas .....	29
3.3. Padangų polimerinio pluošto ir aplinkai draugiškų rišiklių kompozitiniai bandiniai .....	34
<b>Išvados .....</b>	<b>37</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>38</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Įprastinio portlandcemenčio, silikagelio ir ceolitinės atliekos cheminė sudėtis, % (pagal rentgeno fluorescencinę (XRF) analizę).....	22
<b>2 lentelė.</b> Perdirbtų padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių pradinių medžiagų kiekiai .....	26
<b>3 lentelė.</b> Perdirbtų padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių tankiai ir stiprumo bandymo rezultatai.....	27
<b>4 lentelė.</b> Cementinio akmens bandinių pradinių medžiagų kiekiai su cemento pakaitinėmis medžiagomis.....	29
<b>5 lentelė.</b> Perdirbtų padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių pradinių medžiagų kiekiai .....	34
<b>6 lentelė.</b> Pagamintų bandinių su pucolaniniais priedais ir natrio sulfatu charakteristikų lentelė ir stiprumo bandymų rezultatai .....	35



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Gaunami produktai perdirbus padangas .....	20
<b>2 pav.</b> Giratorius.....	21
<b>3 pav.</b> Ceolitinės atliekos (a) ir silikagelio (b) rentgeno difrakcijos kreivės. ....	22
<b>4 pav.</b> Ceolitinės atliekos (a) ir silikagelio (b) mikrostruktūra naudojant SEM tyrimą.....	23
<b>5 pav.</b> Perdirbtų padangų polimerinio pluošto nuotrauka .....	24
<b>6 pav.</b> Darbo schema .....	25
<b>7 pav.</b> Suformuotų padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių nuotrauka .....	27
<b>8 pav.</b> Bandinio stiprumo nustatymo su presu ir deformacijų matuokliu proceso nuotrauka.....	28
<b>9 pav.</b> Padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių tankio priklausomybė nuo šilumos laidumo koeficiento.....	28
<b>10 pav.</b> Cementinio akmens su pucolaninėmis medžiagomis stipris gniuždant po 7 (a) ir po 28 parų (b). ....	31
<b>11 pav.</b> Cementinio akmens su pucolaninėmis medžiagomis bandinių mineralinė sudėtis naudojant XRD analizę. ....	32
<b>12 pav.</b> Padangų polimerinio pluošto ir aplinkai draugiškų rišiklių, skirtingų medžiagų santykių, kompozitiniai bandiniai .....	34
<b>13 pav.</b> Padangų polimerinio pluošto ir aplinkai draugiško portlandcemenčio kompozitinių bandinių tankio priklausomybė nuo sąlyginio šilumos laidumo koeficiento .....	35
<b>14 pav.</b> Tiriamų kompozitinių bandinių aukščio pokyčio (deformacijos) priklausomybė nuo veikiančios jėgos .....	36

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

**CEM I 42,5 N** – portlandcementis be priemaišų, 42,5 stiprio klasės, su įprastiniu stiprio augimu;

**SEM** – skenuojanti elektroninė mikroskopija;

**CEM II** – sudėtinis portlandcementis;

**HE** – plieniniai pluoštai;

**PET** – polietileno tereftalatas;

**PP** – polipropileno pluoštai;

**MIP** – gyvsidabrio įsiskverbimo porometrija.

### Terminai:

**Rišimosi pradžia** – laikas nuo cemento ir vandens sumaišymo iki momento, kai cemento tešla pradeda virsti kietu kūnu.

**Rišimosi pabaiga** – laikas, nuo cemento ir vandens sumaišymo iki momento, kai cemento tešla baigia virsti kietu kūnu.

**Stiprumas gniuždant** – stiprio gniuždant riba, kai bandinys praranda stiprumą ir suyra, išreikšta  $\text{N/mm}^2$  (MPa).

**Stiprumas lenkiant** – stiprio lenkiant riba, kai bandinys praranda stiprumą ir suyra, išreikšta  $\text{N/mm}^2$  (MPa).

## Įvadas

Tiriamas pluoštas pagamintas iš viskozės, poliesterio ir nailono mišinio ir perdirbant padangas susmulkinamas į smulkius pluoštus. Susmulkinus padangų atliekas, tekstilė susmulkinama į smulkius pluoštus ir atskiriama kaip šalutinis gamybos produktas. Toks pluoštas gali būti naudojamas įvairioms reikmėms, pavyzdžiui: padangų armavimo priedams, betoną modifikuojantiems priedams, dirvožemio gerinimo tikslams, pakavimo medžiagoms, garsą slopinančioms dangoms. Po mechaninio smulkinimo ir granuliavimo proceso padangos komponentai nukreipiami į vibruojančius sietus, kurie atskiria perdirbtų padangų gumos granules ir polimerinį pluoštą. Prieš minėtus procesus iš gumos granulių ir polimerinio pluošto mišinio būna pašalinamos plieninės vielos magnetais. Minėtas polimerinis pluoštas dažniausiai būna stipriai užterštas likutinėmis gumos dalelėmis, įterpus šį pluoštą į betoną, šios dalelės gali turėti įtakos betono savybėms. Taigi atliekant magistrinį baigiamąjį darbą buvo sukurta įvairių bandinių naudojant tiek paprastą portlandcementį, tiek aplinkai draugišką. Aplinkai draugiško rišiklio sudėtis buvo pakeista įterpiant pucolaninių priedų, bei greitiklį – natrio sulfatą. Tiriant optimaliausią rišiklio sudėtį buvo pagaminti 13 skirtingų sudėčių rišikliai, buvo stebimas šių rišiklių stiprumas po 7 ir 28 parų. Išrinkus optimaliausią rišiklio sudėtį jis buvo panaudotas gaminant bandinius su perdirbtų padangų polimeriniu pluoštu. Bandinių, kurie buvo pagaminti naudojant polimerinį pluoštą, sudėtys buvo įvairios. Buvo suformuoti bandiniai su skirtingais medžiagų santykiais: 1:1 ; 2:1 ; 4:1 ; 5:1 ; 6:1. Pluošto kiekis buvo išlaikomas tas pats, buvo didinamas tik rišiklio kiekis. Suformuotų bandinių stiprumas, šilumos laidumas ir kitos charakteristikos buvo nustatytos ir palygintos tarpusavyje (su draugišku rišikliu / su įprastiniu rišikliu). Atlikus gautų duomenų analizę buvo padarytos išvados ir išrinktas optimaliausias kompozitinis bandinys.

Darbo tikslas: Utilizuoti polimerinį pluoštą, gautą iš padangų atliekų, cementinėse sistemose

Uždaviniai:

1. Analizuoti ankstesnius tyrimus susijusius su padangų atliekų utilizavimo galimybėmis.
2. Parinkti tyrimų metodologiją ir ištirti pradinių medžiagų pagrindines savybes.
3. Atlikti padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių eksperimentinius tyrimus ir nustatyti pagrindines savybes.
4. Eksperimentiškai ištirti ir analizuoti cementinio akmens su pucolaniniais priedais bandinius.
5. Nustatyti pagrindines padangų polimerinio pluošto ir aplinkai draugiškų rišiklių kompozitų bandinių savybes.

## **1. Literatūros apžvalga**

### **1.1. Temos aktualumas**

Taikymo sritys, kuriose galima naudoti padangas ir kuriose padangų guma yra veiksminga saugant aplinką ir tausojant gamtos išteklius, apima cemento mišinių gamybą, kelių tiesimą ir geotechninius darbus. Padangų perdirbimas pirmiau minėtiems tikslams yra tinkamas utilizavimo būdas dėl aplinkos ir ekonominių priežasčių [1].

### **1.2. Smulkintų guminių padangų utilizavimo galimybės cementiniuose kompozituose**

Siddika ir kt. [2] aptarė guminių padangų atliekas ir gumuotus cementinius kompozitus, taip pat šių medžiagų savybės, naudojimo būdus, ilgaamžiškumą ir eksploatacinės savybės. Šiuo tyrimu buvo siekiama suteikti esminį supratimą apie integruotas guminio betono kompozicinių medžiagų panaudojimo galimybes, siekiant pagerinti statybos metodus. Įterptas perdirbto kaučiuko užpildas palengvina betoną, padidina jo ilgaamžiškumą ir tvirtumą, pagerina jo dinamines savybes ir elastingumą. Betonas su įterptu perdirbto kaučiuko užpildu gali būti eksploatuojamas karštu ir šaltu oru. Nors guminis betonas paprastai turi mažą mechaninį stiprumą, tačiau specifinis jo pritaikymas suteikia galimybes gumines padangų atliekas utilizuoti betone.

Grinys ir kt. [3] nustatė, kad betonui su trupintų gumos atliekų priedu stiprumo pokytį galima prognozuoti iš eksponentinių lygčių. Šios eksponentinės lygtys leidžia nuspėti stiprumo savybių dėsnius, kai į betoną yra pridėdama tam tikro kiekio gumos dalelių. Gautos eksponentinės lygtys rodo, kad didėjant sutrupintam gumos priedui, betono gniuždymo, lenkimo ir skilimo tempimo jėgos mažėja. Taip pat iš eksperimentų galime padaryti išvadą, kad pridėjus nedidelį trupintos gumos kiekį, tempimo stipris padidėja 7 proc.

Serdar ir kt. [4] savo darbe ištyrė padangų atliekų perdirbimo metu gautų produktų poveikį betono savybėms. Tik atsižvelgus į konkrečias kiekvieno gaminio, gauto perdirbant, savybes, galima jas pritaikyti betono pramonėje specialių savybių betono gaminiams paruošti. Gaminiai, į kuriuos galima įterpti padangų atliekų, gali būti ekologiškai, ekonomiškai bei techniškai konkurencinga alternatyva esamiems ir praktikoje naudojamiems produktams.

Tyrimui atlikti [5] buvo naudojamas CEM I 42,5 N cementas. Bandymams buvo naudojamos padangų trupinių gumos atliekos, suskirstytos į 2/4 ir 4/6 frakcijas. Baniniuose smėlis buvo keičiamas gumos trupiniais atitinkamai nuo 5 proc. iki 20 proc. Bandymų metu buvo išmatuoti parametrai: betono stipris gniuždant, vandens sugėrimas, ultragarso impulsų greitis. Taip pat buvo nustatyti bandinių struktūriniai – eksploataciniai rodikliai. Bandymų rezultatai atskleidė, kad gniuždymo jėga sumažėjo 68–61,3%. Vertinant struktūrinius rodiklius buvo pastebėta, kad įterpiant didesnę gumos kiekį tai sumažina santykinių porų ir kapiliarinių sienelių storį bei laisvą erdvę, kurią sudaro poros. Esant didesniam gumos trupinių kiekiui mėginiuose, erdvinis nevienalytiškumo rodiklis palaipsniui didėja, nes didesnis šiurkštesnių gumos granuliu kiekis lemia netolygų porų ir kapiliarų pasiskirstymą pagal jų ilgį. Taip pat buvo pastebėta, kad pakeitus smulkius užpildus gumos trupiniais, atsparumas šalčiui ir šilumai padidėja.

Padangų perdirbimas yra labai svarbus dalykas aplinkos apsaugos ir ekonominiu požiūriu. Panaudotų padangų kiekis JAV peržengė 550 milijonų vienetų per metus ir vis dar sparčiai auga. Europos Sąjungoje skaičiuojami dar didesni skaičiai - iki 1 milijardo padangų per metus. Nenaudojamos ir

paliktos padangos kuria labai žalingą poveikį aplinkai. Padangų šalinimas iš esmės apima labai teršiančius apdorojimo būdus (pvz., degimo procesus mazutui gaminti), o tik nedidelė atliekų dalis (nuo 3% iki 15%) skirta mažiau invaziniam apdorojimui, pvz., milteliams. Šiame straipsnyje Valente ir kt. [6] apžvelgė ankstesnius tyrimus. Tyrimai apimė tokius variantus kai įvairūs padangų atliekų kiekiai yra sumaišomi su cemento mišiniais, kad būtų gaunamas produktas, kuris turi tinkamas mechanines savybes ir būtų tinkamas inžinerinei veiklai. Vieno eksperimento metu gauta, kad didėjant agregacijos tarp gumos trupinių ir smulkinto smėlio procentinei daliai, gniuždymo jėga mažėja. Taip pat pakeitus gumos trupinius ir susmulkintą smėlį, tankis sumažėja maždaug 10%. Taip pat buvo gauta, kad elastingumo modulis priklauso tiesiogiai nuo pridėtų medžiagų. Pavyzdžiui, kuo didesnis kiekis gumos yra pridėdamas į betono mišinį, tuo gautas produktas bus mažiau elastingas. Elastingumas reiškia didesnę stiprumą.

Skripkiūnas ir kt. [7] tyrinėjo sukietėjusį betoną su gumos atliekų priedais. Mišiniai: vienas be gumos atliekų priedų (kontrolinis mėginys) ir mišiniai su skirtinga frakcija (0/1; 1/2; 2/3) ir skirtingu kiekiu (5 %; 10 %; 20 %; 30 % iš smulkaus užpildo) masės) gumos atliekų priedų. Bandymų metu buvo nustatyta gumos įtaką betono įvairioms charakteristikoms ir kitoms savybėms kaip stiprumas. Šiame tyrime buvo gautas betono (su gumos atliekų priedais) stiprio sumažėjimas gniuždant ir lenkiant. Gumos atliekų pridėjimas prie betono sumažino dinaminį elastingumo modulį, bet padidino betono vibracijos slopinimą. Gumos atliekų kiekis turėjo didesnę poveikį betono vibracijų slopinimo savybėms nei dalelių dydžio pasiskirstymui.

Dalinis betono užpildų pakeitimas perdirbtomis medžiagomis galėtų padėti kovoti su mažėjančiu kai kurių gamtos išteklių (pvz., natūralaus smėlio) prieinamumu ir tuo pačiu padėti panaudoti didėjančių atliekų, pvz., naudotų padangų, kieki. Ši teorija buvo pabandyta įgyvendinti praktikoje, todėl bandant sukurti tvaresnę medžiagą cemento pagrindu, buvo bandyta medžiaga vadinama gumuotu betonu arba sutrupintos gumos betonu. Šis betonas atsparesnis, atsižvelgiant į medžiagos lankstumą ir atsparumą smūgiams, tačiau yra silpnesnis nei tradicinis betonas. Atlikti tyrimai atskleidė, kad norint gauti didelį stiprumą turintį gumuotą betoną reikia iš anksto numatyti įvairius betono priedus ir nustatyti tinkamą gumos kiekį. Taip pat būtina klasifikuoti kombinuotus gumos dydžius. Li ir kt. [8] šiame dokumente apžvelgė iki šiol atliktus tokio betono tyrimus, daugiausia dėmesio skiriant medžiagos savybėms bei taip pat atsižvelgiant ir į galimus šio betono pritaikymus. Galiausiai aptariami būsimi tyrimai, kurie yra būtini norint įrodyti šios kompozitinės medžiagos naudingumą gelžbetoniniuose konstrukciniuose elementuose.

Šiomis dienomis padangų utilizavimas yra didžiulė problema visame pasaulyje. Kiekvienais metais milijonai padangų yra išmetamos arba palaidojamos po žeme, o tai daro didžiulę žalą pasaulio ekologijai. Buvo apskaičiuota, kad beveik 1000 milijonų padangų kasmet baigia eksploatuoti, o daugiau nei 50% išmetamos į sąvartynus ar šiukšles be jokio apdorojimo. Iki 2030 metų reguliariai bus išmetama 5000 milijonų padangų. Padangų utilizavimas deginant yra lengviausias ir patogiausias jų šalinimo būdas, bet taip pat yra ir labai žalingas ir kelia rimtą gaisro pavojų. Toje vietoje kur yra deginamos padangos pakyla temperatūra. Nuodingi dūmai su kenksmingais junginiais yra labai toksiški žmonėms, augalams bei gyvūnams. O po degimo proceso likusios medžiagos teršia aplinką. Taigi viena iš alternatyvų pakeisti šį procesą gali būti padangų atliekų įterpimas į cementinį betoną. Šiame straipsnyje [9] pateikiama kai kurių paskelbtų tyrimų, susijusių su šviežiomis ir sukietėjusiomis gumuoto betono savybėmis, apžvalga. Iš literatūros buvo pastebėta, kad tinkami betono mišiniai gali būti pagaminti iš padangų gumos laužo ir galima pagaminti lengvą gumos užpildą betonui tam tikriems tikslams. Buvo iširta, kad betonas su gumomis daro teigiamą poveikį užšalimo

ir šildymo požūriū. Taip pat padidina atsparumą rūgščių poveikiui bei chlorido jonų persiskverbimui. Silicio dioksido dūmų panaudojimas šioje medžiagoje leidžia padidinti stiprumą ir didesnę atsparumą tokioms aplinkoms kaip – sulfatinės, rūgštinės ar chloridinės.

Šiame straipsnyje [10] yra pateikiama, kaip kinta betono savybės ir kokią įtaką turi perdirbtos padangų atliekos, kurios yra naudojamos kaip antrinės žaliavos. Pasinaudojant šiomis savybėmis, Zagrebo universiteto Statybos fakultete buvo sukurti keli specialios paskirties statybos produktai, kurių sudėtyje yra žaliavų, gautų perdirbant padangas. Kiekvienas šių produktų pasižymi nekenksmingu, funkcionaliū ir ekonomišku pakaitalu šiomis dienomis naudojamiems produktams.

Polimerinės atliekos, tokios kaip padangos, ar polietileno tereflato buteliai sparčiai tampa vis didesnė problema pasaulyje. Buvo padaryta statistika, kad kiekvienais metais eksploatacinį periodą baigia apie 1000 milijonas padangų, o iki 2030 m yra tikimasi, kad bus išmetama reguliariai dar 5000 milijonų padangų per metus. Iki dabar nedidelė dalis šių padangų yra perdirbama. Milijonai padangų yra tiesiog paliekamos sąvartynuose, palaidotos po žeme ar kaupiamos kitose vietose. Per metus polietileno tereflato butelių suvartojimas peržengia daugiau kaip 300 000 milijonų vienetų. Šiame straipsnyje Pacheco-Torgal ir kt. [11] apžvelgė betono, kuriame yra padangų gumos ir PET atliekų, eksploatacinius tyrimus. Taip pat šiame straipsnyje yra aprašomas nereikalingų atliekų apdorojimo būdo ir tų atliekų dydžio poveikis nesustingusiam ir sukietėjusiam betono fizinėms charakteristikoms.

Dėl daugybės problemų, susijusių su panaudotų padangų išmetimu, šios pramonės atliekos buvo pradėtos naudoti įvairiai. Jau nuo dešimtojo dešimtmečio pradžios buvo tiriamas betonas, kuriame yra guminių užpildų, kurie yra gaunami iš sunaudotų padangų. Ankstesni tyrimai daugiausia buvo susiję su betono mechaninėmis savybėmis. Tačiau šiame tyrime Bravo ir kt. [12] įvertino šių užpildų veikimą ilgalaikumo požūriū. Buvo atlikta įvairiausių bandymų, pradedant nuo susitraukimų stebėjimo, vandens absorbcijos panardinant ir baigiant karbonizacijos ir atsparumo įvairioms terpėms bandymų. Buvo gaminami betono mišiniai, kuriuose 5%, 10% ir 15% natūralaus užpildo tūrio buvo pakeisti užpildais, kurie gauti iš panaudotų padangų. Smulkūs ir stambūs užpildai buvo pakeičiami tiek vienu metu, tiek atskirai. Šiame tyrime taip pat buvo iširta ir padangų gumos smulkinimo proceso įtaką. Kai kurie betono bandiniai buvo gaminami panaudojant mechaniškai apdorotą užpildą, o kai kiti – panaudojant užpildus, pagamintus kriogeninės technologijos principu.

Pastaraisiais dešimtmečiais didėja atliekų sukelta aplinkos tarša, vienas iš jų yra automobilių padangos, kurios perdirbamos įvairiais būdais, įskaitant mechaninį šlifavimą. Vienas iš populiariesnių padangų gumos panaudojimo būdų yra perdirbtų dalelių panaudojimas kaip statybinių medžiagų užpildas, hidrauliniame betone. Nepaisant to, pridėjus jas - gaunamos žalingos mechaninių savybių vertės. Siekiant išspręsti minėtas problemas, šiame darbe Herrera-Soso ir kt. [13] siūlo naują pasiūlymą - pakeisti automobilių padangų dalelių atliekų, anksčiau gautų šlifavimo metu, fizikines ir chemines savybes, naudojant gama apšvitą. Kad pakeitus savybes, šios dalelės būtų efektyviai naudojamos kaip priedas hidraulinio betono savybių stiprinimui. Bandymo rezultatai parodė, kad gumos apšvitinimas gama spinduliuote, bei tinkamas jų dalelių kiekis betono mišinyje turėjo teigiamos įtakos. Taip pat tyrime [13] pastebimi SEM vaizdai, pagal kuriuos galime pamatyti, kad vaizdas yra susijęs su mechaninėmis savybėmis. Pavyzdžiui, šiurkštus padangų dalelių paviršius keičiasi - dėl polimerinių grandinių susiejimo susidaro daugiau lygių paviršių. Nepaisant to, vartojant didesnes apšvietos dozes, pastebimi įtrūkimai atsirandantys polimerų grandinėse.

Atliekų panaudojimas statybinėse medžiagose yra būtinas ir reikalingas tyrimų spektras. Į betoną gali būti įdedama įvairios rūšies ir kilmės medžiagų, kurios gali teigiamai paveikti kai kurias savybes ir taip pat pakeisti kitus naudojamus užpildus. Barbuta ir kt. [14] straipsnyje pateikia ekologinių betonų, kuriuose buvo padangų atliekų laužo ar miltelių, eksperimentinių tyrimų rezultatus. Šiame tyrime buvo tyrinėjami skirtingi bandiniai, įskaitant dviejų tipų betoną. Pirmasis betonas su cementu, antrasis su polimero betonas. Į bandinius buvo įterpiama skirtingas padangų atliekų kiekis: cemento betono atveju padangų buvo pridėta 25, 30, 40 ir 50 proc. Polimerinio betono atveju buvo dedama nuo 6,4 iki 23 proc. atliekų. Bandymo metu buvo nustatytas kubų gniuždymo stiprumas, tempiamasis stipris lenkiant ir skilimo stipris. Padangų atliekų pridėjimas sumažino mechaninio stiprumo vertes. Rezultatai rodo, kad cemento betono atveju teigiami rezultatai buvo gauti naudojant betoną su priemaišomis ir 25 proc. padangų atliekų. Polimerinio betono atveju, su 23 proc. epoksidine derva ir 17 proc. padangų miltelių. Šie bandiniai parodė didžiausią gniuždymo stiprumą. Tempimo stiprumo atžvilgiu, mišiniais su mažesne dervos ir padangų miltelių kiekiu parodė didesnes vertes.

Malaiškienė ir kt. [15] atliko tyrimą, kurio pagrindinis tikslas buvo ištirti ir nustatyti tikslų perdirbtų padangų kordo verpalų atliekų su pritvirtintomis gumos dalelėmis poveikį betono mišiniuose. Bandyje buvo naudojamas dviejų tipų cementas t.y. paprastas portlandcementis CEM I ir portlandcementis su kalkakmenio priedu CEM II. Gijų atliekos (pridedamos 0%, 2%, 4%, 6%, 8% ir 10% smulkių užpildų) yra vandenį sugeriantis tekstilės pluošto priedas su gumos dalelėmis, todėl reikia daugiau vandens paruošti betono mišinį. Naudojant šį pluoštą betono tankis mažėja, stiprumas taip pat. Tačiau vandens absorbcija didėja. Prognozuojamas betono atsparumas užšalimui ir atšildymui, naudojant CEM I tipo cementą ir perdirbtą padangų kordą, padidėja. Kai naudojamas CEM II tipo cementas, atsparumas sumažėja, tačiau išlaiko panašų atsparumą - maždaug 1000 užšalimo ir atšildymo ciklų. Kai į betono mišinį pridedama 10% perdirbtos padangos tekstilės virvės, šilumos laidumo koeficientas sumažėja maždaug 35%.

### **1.3. Padangų gumos atliekų utilizavimas asfalto gamyboje**

Padangų atliekos kelia didelį pavojų sveikatai ir aplinkai, jei jos yra netinkamai perdirbamos ir (arba) išmetamos. Bėgant metams, padangų atliekų perdirbimas vis plačiau taikoms į civilinės inžinerijos programas, ypač į asfalto dangos mišinius ir portlandcemenčio betoną. Šioje apžvalgoje Shu ir kt. [16] apibendrina naujausią padangų gumos atliekų naudojimo pažangą asfalto ir portlandcemenčio betono gamyboje. Perdirbtos padangos trupinių įterpimas į asfalto dangos mišinį jau buvo senai įrodytas kaip teigiamą įtaką darantis asfalto komponentas, dėl puikaus asfalto rišiklio ir guminių trupinių suderinamumo. Tai pagerina įvairias asfalto fizikines savybes. Padangų gumos panaudojimas portlandcemenčio betone nebuvo ypač sėkmingas dėl gumos ir cemento cheminių charakteristikų skirtumų, bei dėl didelio medžiagų standumo skirtumo. Yra siūloma daug metodų, siekiant pagerinti medžiagos, kuriose buvo panaudota guma, savybes eksploatacijoje.

Gumos trupininis modifikuotas asfalto mišinys sulaukė sparčiai augančio susidomėjimo kaip tvarios grindinio medžiagos, nes leidžia padangų atliekas perdirbti į patvarias ir mažai triukšmo keliančias asfalto dangas. Bet šis modifikuoto asfalto mišinio panaudojimas yra iššūkis dėl aukštos apdorojimo temperatūros, bei didelio kiekio energijos poreikio. Taip pat šie procesai išskiria daug pavojingų žmogui emisijų. Įrodyta, kad paviršinio aktyvumo medžiaga, tipišką šilto mišinio asfalto priedas, veiksmingai sumažina šio mišinio apdirbimo problemas, akivaizdžiai nepabloginant jo mechaninių savybių. Buvo pastebėta, kad įtakos mišiniui turi maišymo seka. Šio tyrimo pagrindinis tikslas yra ištirti šilto modifikuoto asfalto mišinio paruošimo būdą, kuris įtakoja medžiagos fizikines savybes. Mišinys buvo maišomas šešiais skirtingais variantais. Buvo išmatuotos ir palygintos paruoštų mišinių

savybės, įskaitant Maršalo stabilumą ir tėkmės vertę, apdirbamumą, reologines savybes, atsparumą provėžoms, jautrumą drėgmei ir atsparumą nuovargiui. Siekiant nustatyti optimalią šilto mišinio maišymo seką, atsižvelgiant į bendrą inžinerinį efektyvumą, buvo naudojamas analitinės hierarchijos procesas. Rezultatai patvirtino, kad maišymo procedūra turi įtakos šio mišinio fizikinėms charakteristikoms. Įterpus anksčiau paviršinio aktyvumo priedą, buvo pastebėtas neigiamas poveikis mišinio mechaninėms savybėms. Tačiau tai leidžia sutaupyti daugiau energijos, kuri sunaudojama gaminat asfalto rišiklį su guma. Šis tyrimas [17] ir analizės rezultatai parodė, kad iš šešių maišymo sekų optimaliausias variantas yra, kai guma pirmiausia sugeria aktyviąją paviršiaus medžiagą, o tada į neapdorotą asfaltą įmaišoma gumos ir aktyviojo paviršiaus medžiagos junginio, o galiausiai modifikuotas rišiklis sumaišomas su užpildais.

Panaudotų padangų gumos, kaip asfalto modifikatoriaus, perdirbimas yra žinomas kaip tvarios dangos klojimo technologija, kurios pranašumai apima didesnę dangos patvarumą, naudotų padangų suvartojimą ir triukšmo mažinimą. Tačiau šios technologijos panaudojimas buvo apribotas dėl didelės statybų emisijos. Šilti gumos ir asfalto mišiniai lyginant su mums įprastais karšto asfalto mišiniais, ženkliai sumažina šiems mišiniams pakankamos (maišymo ir sutankinimo) temperatūros poreikį. Dauguma atliktų tyrimų parodė, kad gumos panaudojamas šiltam asfalto mišiniui pagaminti efektyviai veikia, lyginant įvairius būdus. Šioje apžvalgoje [18] buvo apibendrinti 165 publikacijų išvados. Jame buvo apibendrinti naujausi šilto asfalto su guma pokyčiai įvairiais aspektais, įskaitant reologines savybes, mišinio dizainą, mišinio mechanines charakteristikas, panaudojimą lauke, statybų emisiją bei asfalto, gumos ir priedų sąveiką.

#### **1.4. Perdirbtų padangų polimerinių pluoštų įtaka betono savybėms**

Padangų atliekų perdirbimas, kaip betono priedas, yra galimas šalinimo sprendimas. Gumuotas betonas gali prisidėti prie tvarios statybos naudojant pramonines atliekas, sumažinant gamtos išteklius ir gaminant efektyvesnę medžiagą. Šiame darbe [19] atliekamas eksperimentinis tyrimas, siekiant įvertinti betono, kuriame yra guminių padangų pluoštų atliekų, lenkiamąjį stiprį, atsparumą gniuždymui, atsparumą dilimui ir karbonizacijai. Buvo įrodyta, kad didėjant gumos pluoštų pakeitimo lygiui, padidėja lenkimo stiprumas ir atsparumas dilimui. Be to, taip pat pastebėta, kad didėjant gumos atliekų pakeitimo lygiui kinta gniuždymo stipris ir karbonizacijos gylis.

Šiame straipsnyje aprašomi kelių tyrimų, kuriuos atliko Banthia ir kt. [20], siekdami įvertinti padangų laužo polimerinio pluošto ir plieno laužo pluošto įtaką cemento pagrindo kompozitams. Buvo išnagrinėta dabartinė padangų šalutinių atliekų valdymo praktika, pluošto charakteristikos ir jų įtaka plastiko susitraukimo įtrūkimams bei mechaninis cemento medžiagų atsakas po įtrūkimo. Taip pat pateikiama išsami informacija apie instrumentinį demonstracinį projektą, kai padangų laužo polimerinis pluoštas buvo naudojamas kaip mikro pluošto sutvirtinimas betoninei dangai, kuri skirta naudoti automobilių stovėjimo aikštelėse, Kanados Pirmųjų Tautų bendruomenėje. Panaudotas bandyme padangų laužo polimerinis pluoštas buvo 18–20 μm pločio ir 3–5 mm ilgio, prie pluoštų buvo prilipę gumos trupiniai. O plieno laužo pluoštas buvo klasifikuojamas taip: 10–13 mm ir 13–16 mm ilgio bei 0,2–0,3 mm skersmens. Lyginant su paprastu skiediniu, įterpus 0,4% padangų polimerinio pluošto, buvo gauta, kad tai sumažino susitraukimo įtrūkimų plotą maždaug 97,5%. Minėtas rezultatas buvo labai panašus į tą, kurį padaro 0,3 proc. gryno polietileno tereftalato pluoštas. Nors trumpas padangų polimerinio pluošto ilgis neleidžia jam kontroliuoti visų įtrūkimų, jo hibridizacija su plieniniu makro pluoštu leido sinergiškai padidinti skiedinio kietumą ir likutinį stiprumą. Rezultatai taip pat parodė, kad danga su įterptu padangų polimerinio pluoštu turėjo pastebimai mažesnę polinkį įtrūkti. Autoriai mano, kad taip galima žymiai pagerinti eksploatacines



charakteristikas. Ir šie rezultatai rodo milžinišką padangų pluošto laužo potencialą naudoti betone kaip armatūrą.

Šiuo metu daugumoje pasaulio šalių padangų laužo polimerinių pluoštų pakartotinio panaudojimo vertė yra ribota, todėl jie daugiausia užpildomi žemėmis. Tačiau dėl šių minėtų utilizavimo būdų išsiskiria toksiškos dujos ir rūgštys, kurios yra labai pavojingos žmogui ir kitiems organizmams. Onuaguluchi ir kt. [21] šiame tyrime ištyrė padangų polimerinio pluošto pakartotinio naudojimo metodą, buvo išnagrinėta galimybė, kad ji gali padidinti cemento kompozitų liekamąjį stiprį ir atsparumą dilimui. Be to, taip pat buvo įvertinta tikimybė pagerinti minėtas savybes, hibridizuojant pluoštą su komerciniais makro pluoštais, tokiais kaip plieniniai (HE) ir polipropileno (PP) pluoštai. Tyrime naudojami cementinius kompozitinius bandinius sudaro 0,5 v/c santykį turintis skiedinio rinkinys ir du betono variantų rinkiniai, atitinkantys 0,5 ir 0,4 v/c santykius. Bandymo rezultatai parodė, kad skiedinio ir betono mišinių variantų, kurie buvo sustiprinti su padangų polimeriniu pluoštu, liekamieji stipriai po atsivėrusių įtrūkimų buvo apie 0,1 MPa ir 0,1-0,2 MPa atitinkamai. Apžvelgiant padangų polimerinio pluošto poveikį, šiuo pluoštu sustiprinti bandiniai neturėjo jokios naudingos įtakos. Tačiau, hibridizavus 0,35% plaušo su 0,2-0,5% makro pluoštais, dėl teigiamos pluoštų sinergijos buvo pasiekti skiedinio mišiniai, kurių liekamasis įtempis po įtrūkimų svyruoja nuo 1,4 iki 3,1 MPa. Hibridinis betono sutvirtinimas 0,35% padangų pluošto ir 0,35% HE pluošto taip pat paskatino teigiamą sinergiją ir pagerino liekamojo stiprio po įtrūkimų pajėgumą, ypač esant 0,50 v/c santykio mišiniui. Lyginant su paprastu betonu, bandiniai su 0,35% padangų polimerinio pluošto arba su 0,35% padangų pluošto ir 0,35% PP, neturėjo įtakos betono atsparumui dilimui. Priešingai, suminis betono, sustiprinto su 0,35% padangų polimeriniu pluoštu ir 0,35% su HE pluoštu, tūrio sumažėjimas sumažėjo maždaug 8,9% ir 16,1% atitinkamai 0,50 ir 0,40 m/c santykio betono mišiniams. Rezultatai parodė, kad hibridizuotas padangų polimerinis pluoštas su plieniniais pluoštais, gali būti naudojamas kaip tvari alternatyva.

Betono su guma panaudojimo tyrimai ir jų rezultatai pagrindžia tvirtą pagrindą, kad padangų atliekos gali būti naudojamos, ten kur medžiagos stiprumas nėra pagrindinis aspektas. Šiame straipsnyje [22] buvo įvertintas betono su padangų pluošto atliekomis savybės, kai temperatūra pakelta. Eksperimento metu buvo atliktas tyrimas, kurio metu buvo analizuojama aukštesnės temperatūros įtaka gniuždymo stipriui, masės praradimams, tamprumo modulio kitimui, dinaminio elastingumo modulio kitimui bei vandens pralaidumui kontroliniame mišinyje. Buvo atsižvelgta į dvejų tipų aušinimą, įprastą aušinimą ir greitą aušinimą, kad būtų nustatytas poveikis gniuždymo stipriui. Tyrime metu taip pat buvo žiūrima į šešias temperatūros reikšmes su trimis ekspozicijos trukmėmis. Taip pat siekiant iširti pakilusios temperatūros įtaką plyšiams buvo pasitelkta mikrostruktūros analizė. Buvo analizuojami gumos pluošto bei cemento matricos susijungimai.

Jungtinėse Valstijose yra labai rimtų problemų dėl padangų atliekų šalinimo. Gregory Marvin Garrick [23] atliko eksperimentus, siekiant nustatyti, kaip betono savybes pakito įtraukiant padangų atliekas. Perdirtų padangų gumos buvo panaudojamos skirtingu pavidalu – drožlės ir pluoštai. Pluoštai buvo suskirstomi į skirtingus ilgius, tam kad būtų pastebimas poveikio skirtumas, lyginant skirtingo ilgio pluoštus. Atlikus eksperimentą buvo gauta, kad įterpus šiuos minėtus komponentus, betono gniuždymo jėga sumažėjo. Buvo padaryta išvada, kad padangų pluošto atliekos buvo tinkamesnės lyginant su padangų drožlėmis. Buvo atliktas analitinis modelis, siekiant nustatyti kaip kritinis pluošto ilgis turi įtakos galutiniam kompozito tempimui. Trimatė baigtinių elementų analizė buvo atlikta naudojant ANSYS programinę įrangą. Analizės rezultatai buvo pasitelkti nustatant kritinį

pluošto ilgį. Sukurti modeliai galėjo būti naudojami nustatant galutinio tempiamo stiprio vertes, kuri buvo labai artima lyginant su eksperimentiniais rezultatais.

Šiame dokumente [24] yra pateikiamas padangų polimerinio pluošto panaudojimas betonuose, kaip alternatyva įprastam polipropileno pluoštui, tyrimas. Buvo nustatytas sukietėjusio betono tankis, oro kiekis, hidratacijos šiluma, ankstyvosios deformacijos, gniuždymo stiprumas, elastingumo modulis ir atsparumas šalčiui. Bandymo metu buvo analizuojamas pluoštas ir buvo gauta, kad tiek išvalytas, tiek neišvalytas perdirbtų padangų polimerinis pluoštas gali būti naudojamas betonuose, nežiūrint gumos švarumą ir jos užterštumo lygį. Pavyzdžiui, iki 10kg/m<sup>3</sup> mišraus perdirbtų padangų polimerinio pluošto neturėjo neigiamos įtakos betono stipriui. Taip pat iki 2 kg/m<sup>3</sup> išvalyto pluošto nepadarė neigiamos įtakos mechaninėms savybėms. Taigi buvo sudaryta išvada, kad šis pluoštas gali pagerinti betono elgseną ankstyvojo stadijoje bei padidinti atsparumą veikiant agresyviai aplinkai.

Tyrimą atliko Onuaguluchi ir kt. [25], tyrime buvo ištirtas cemento pagrindu pritaikytas padangų pluošto polimerinio laužo pluoštas, kuris iki šiol buvo naudojamas kaip iš padangų gautas kuras arba išmetamas į sąvartynus. Tyrime buvo nagrinėjama paviršiaus morfologija. Taip pat buvo daromi tyrimai apie šarminį pluoštų stabilumą, pluošto poveikį plastiko susitraukimo trūkims, gauto skiedinio mikrostruktūrai bei ilgaamžiškumui ir patvarumui. Atlikti tyrimai parodė, kad stabilesnis šarminėje aplinkoje buvo padangų polimerinis pluoštas, kuris daugiausia sudarytas iš poliesterio pluošto, lyginant su įprastais polietileno tereftalato pluoštais. O lyginant su etaloniniu mišiniu, 0,4 proc. padangų polimerinio pluošto ir 0,3 proc. PET pluošto įterpimas sumažino plastiko susitraukimo plyšio plotą 97,5 proc. ir 99,4 proc. atitinkamai. Tyrimo metu nebuvo pastebėtas su padangų polimeriniu pluoštu sustiprintų bandinių savybių pablogėjimas, ilgio išsiplėtimo ir mechaninio stiprumo praradimo sąlygomis. Buvo pastebėta, kad pagreitėjo kietėjimas ir atsparumas išoriniams sulfatų poveikiams.

Betone dažnai naudojami įvairių tipų pluoštai, siekiant išvengti mikro įtrūkimų dėl susitraukimo, o polipropileno pluoštai yra vieni iš dažniausiai naudojamų. Jei to nepadarysite, mikro įtrūkimai gali sukelti didesnių įtrūkimų atsiradimą, todėl agresyvios medžiagos gali prasiskverbti iš aplinkos ir sumažėja betoninių konstrukcijų patvarumas. Serdar ir kt. [26] iškėlė hipotezę tyrimui, kad polipropileningieji pluoštai siekiant sukontroliuoti mikro plyšius betone dėl susitraukimo gali būti pakeisti polimeriniais pluoštais, kurie yra gaunami iš perdirbtų padangų. Buvo paruošta keletas betono bandinių, kurie sudėtyje yra polipropileno pluoštų ir minėtų polimerinių pluoštų. Atlikus tyrimą, hipotezė buvo patvirtinta. Polipropileningus pluoštus galima pakeisti polimeriniais padangų pluoštais padidinus jų kiekį didesniu. Pakeitus pluoštų kiekį didesniu kiekiu buvo gauti panašūs susitraukimo rezultatai. Gauti tyrimo rezultatai įrodo, kad polimeriniai pluoštai yra perspektyvi medžiaga ir rodo didelį potencialą gaminant betono gaminius. Tuo pačiu šio pluošto panaudojimas išspręstų ir padangų atliekų utilizavimo problemą, kuri šiuo metu yra labai svarbi pasaulyje.

Aprašomame tyrime Baricevic ir kt. [27] iškėlė hipotezę, kad padangų polimerinis pluoštas gali būti panaudotas kaip mikro armatūra, šlapiam purškiami betono mišiniui paruošti. Eksperimento metu buvo pagaminti du bandinių tipai t.y. su orą įtraukiančiu mišiniu ir oro neįtraukiančiu mišiniu. Kiekviename bandinių tipe buvo pagaminti mišiniai su 0,9 kg/m<sup>3</sup> ir 1,8 kg/m<sup>3</sup> polimerinio pluošto. Kad būtų lengviau palyginti, buvo paimta ir paprasto mišinio be pluoštų, ir mišinio su polipropileno (PP) pluoštais. Eksperimento metu mišiniai nebuvo įvertinti dėl galimo savybių praradimo transportavimo metu. Taip pat nebuvo įvertintas ir dujų pralaidumas, atsparumas šalčiui bei kaitinimui. Rezultatai rodo teigiamą perdirbtų padangų polimerinio pluošto poveikį užšalimo ir

atšildymo ciklą metu bei drėgnai purškiamų mišinių atsparumą deformacijai. Taip pat buvo pastebėti transportavimo savybių skirtumai tarp mišinių - su oro pritraukimu ir be jo. Šie skirtumai paaiškinami porų struktūros pokyčiais, kurie buvo nustatyti naudojant gyvsidabrio išsiskverbimo porosimetriją (MIP).

Perdirbto padangų polimero pluošto naudojimas betono gamyboje yra įmanomas siekiant skatinti tvarų vystymąsi ir sušvelninti aplinkos taršą. Šiame dokumente [28] pirmą kartą pateikiamas eksperimentinis tyrimas dėl betono, sutvirtinto perdirbtų padangų polimeriniu pluoštu, lenkimo nuovargio, atsižvelgiant į skirtingas pluošto dozes (1,2, 2,4, 4,8 ir 9,6 kg/m<sup>3</sup>). Atlikto tyrimo rezultatai parodė, kad pluošto įterpimas pagerino betono lenkiamąjį stiprį 3,6-9,6 proc. Labiausiai pasižymėjo bandiniai su 4,8 kg/m<sup>3</sup>, šie bandiniai turėjo didžiausią nuovargio tarnavimo laiką. Polimerinis pluoštas ir polipropileno pluoštas gelžbetonyje pasižymėjo panašiomis nuovargio charakteristikomis. Taigi 0,2-0,4 proc. polimerinio pluošto gali pakeisti maždaug 0,1 proc. polipropileno pluošto betonuose, lygint bendrus statinius, dinامينius ir kitus rodiklius.

Šiame dokumente Chen ir kt. [29] pateikė sistemingą tyrimą dėl galimybės panaudoti perdirbtų padangų polimerų pluoštus, siekiant sumažinti betono žalą, kuri sukeliama nuo pakilusios temperatūros. Buvo atlikta daugybė bandymų, siekiant ištirti padangų polimerinių pluoštų poveikį mechaniniam ir šiluminiam elgesiui, porų slėgio padidėjimui ir mikrostruktūrinei evoliucijai betone, aukštesnėje temperatūroje (20, 105, 250, 400 ir 600 ° C). Buvo ištirtas pluoštų poveikis, mažinantis poveikius betonui nuo aukštesnės temperatūros. Rezultatai rodo, kad pluoštų pridėjimas veiksmingai užkirto kelią porų slėgio kaupimuisi ir žymiai sumažino betono pažeidimus aukštoje temperatūroje. Padangų polimerinių pluoštų lydymasis ir terminis nesuderinamumas (tarp pluoštų ir betono), paskatino tinklo susidarymą tarp betono porų ir mikro plyšių. Buvo įrodyta, kad padangų polimerinis pluoštas yra perspektyvi ir tvari alternatyva - gaminamiems polimeriniams pluoštams, siekiant pagerinti betono atsparumą aukštai temperatūrai ir ugniai. Taigi optimaliausias polimerinių pluoštų kiekis buvo nustatytas – 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Rezultatas buvo nustatytas atsižvelgiant į stiprumo praradimą ir žalos mažinimo efektyvumą bandiniuose.

Šiame straipsnyje [30] pateikto tyrimo tikslas yra ištirti galimybę - pakeisti betone esančius polipropileno pluoštus (PP), perdirbtais polimeriniais pluoštais, gautais iš netinkamų naudoti padangų. Sustiprinti betonai su perdirbtų padangų polimeriniu pluoštu (5, 10 ir 15 kg/m<sup>3</sup>) buvo palyginti su paprastu betonu ir betonu, kuriame yra 1 kg/m<sup>3</sup> polipropileno (PP) pluošto. Tyrimas apėmė šviežio betono savybių (darbingumo, oro kiekio ir tankio) bei mechaninių savybių (stiprio gniuždymui ir elastingumo modulio) ir ankstyvojo amžiaus deformacijų bandymus. Gauti rezultatai parodė, kad tuo pat metu žymiai sumažėjo ankstyvojo amžiaus deformacijos betono mišiniuose, naudojant perdirbtų padangų polimerinį pluoštą, palyginti su etaloniniais mišiniais, kurių mechaninės savybės labai skiriasi.

Tuneliuose gaisro padarytas pažeidimas gali būti milžiniškas. Tai gali sukelti didelių ekonominių išlaidų ir galimų žmonių gyvybių praradimo. Dėl šių minėtų priežasčių būtina užtikrinti tinkamą konstrukcinę apsaugą, ugnies požiūriu. Tūkstančiai tonų polimerinių pluoštų visame pasaulyje susidaro kaip šalutinis produktas, perdirbus netinkamas naudoti padangas. Šių pluoštų sandėliavimas yra problema, nes jie yra degūs, mažo tankio (todėl labai didelis) ir gali būti nunešti vėjo bei teršia aplinką. Taip pat šis pluoštas yra žalingas gamtai, todėl negali būti tinkamai aglomeruotas. Polimerinis pluoštas, perdirbtas iš padangų, yra vienodai aukštos kokybės ir patvarus kaip ir pagaminti pluoštai. Šiame dokumente Figueiredo ir kt. [31] nurodo preliminarius šio tyrimo

rezultatus, kurie parodo šių perdirbtų pluoštų panaudojimo galimybes – užkertant kelią gaisro plitimui.

Perdirbant panaudotas padangas susidaro milžiniški kiekiai subproduktų, apie 10–15 proc. visos masės. Vienas iš subproduktų yra polimerinis pluoštas. Šio tyrimo tikslas – lyginamasis poveikio aplinkai įvertinimas, susijęs su trimis skirtingais tekstilės pluoštų naudojimo pabaigos scenarijais. Landi ir kt. [32] šiame tyrime (be sąvartynų ir deginimo) svarsto galimybę pakartotinai naudoti tekstilės pluoštus kaip sutvirtinimą bituminiuose konglomeratuose. Gyvavimo ciklo vertinimo tyrimo rezultatai patvirtina, kad pakartotinio naudojimo scenarijus atitinkamai sumažins poveikį, atsižvelgiant į visuotinio atšilimo potencialą.



**1 pav.** Gaunami produktai perdirbus padangas

## 2. Tyrimų metodologija

### 2.1. Tyrimo metodai.

Portlandcemenčio, silikagelio ir ceolitinių atliekų cheminė sudėtis buvo analizuojama pasitelkiant rentgeno fluorescencinį spektrometrą (*Bruker X-ray S8 Tiger WD*), naudojant radžio vamzdelį, anodo įtampą iki 60kV bei elektros srovę iki 130mA. Analizuojami bandiniai buvo mėginti helio dujų terpėje. Matavimai atlikti naudojant *SPECTRA Plus QUANT EXPRESS* metodą.

Minėtų medžiagų rentgeno difrakcinė analizė buvo atlikta pasitelkiant *D8 Advance* difraktometrą (*Bruker AXS*), kuris veikia 40 kV vamzdžio įtampa ir 40 mA srove. Rentgeno spinduliai buvo filtruojami nikelio filtru (0,02mm). Buvo pasirinkamas tinkamas  $CuK\alpha$  bangos ilgis. Analizuojamos medžiagos buvo nuskaityto  $2\theta$  diapazone nuo 3 iki 70 laipsnių kampo, nuskaitymo greitis buvo 6° min-1. Analizuojant buvo susietas dviejų teta/teta nuskaitymo tipas. Specifinis paviršinis plotas buvo nustatytas ir išmatuotas Bleino prietaisu pagal tam tikrą EN 196-6:2010 standartą.

Silikagelio, ceolitinės atliekos ir cementinio akmens mikrostruktūros buvo tiriamos skenuojančia elektronine mikroskopija. Nebuvo naudojami specialūs mėginių paruošimai (poliravimas ar dengiamųjų medžiagų naudojimas). Buvo pasitelktas didelė raiška pasižymintis skenuojantis elektroninis mikroskopas – *ZEISS EVO MA10*.

Norint išsiaiškinti cementinio akmens stiprumo charakteristikas, iš normalios konsistencijos tešlos suformuoti 2x2x2 cm bandiniai. Vandens ir kietų medžiagų santykis ir mišinio kietėjimo laikas (normali konsistencija) buvo nustatyti pagal standartą EN 196-3. Cementinio akmens bandinių stipris gniuždant buvo įvertintas po 7 ir 28 dienų. Kiekvienų suformuotų bandinių stiprio vertė buvo nustatoma iš šešių bandinių stiprio reikšmių vidurkių. Bandiniai gniuždyti presu *ELE AutoTest*.

Kompozitinių bandinių formavimas buvo atliekamas pasitelkiant giratorių. Tai intensyvaus tankinimo prietaisas, kuris naudojamas kietų dalelių, tokių kaip betonai, gruntai ar grindinio medžiagos sutankinamumo tyrimams ir bandymams atlikti. Šlyties efektas, veikiant slėgiui leidžia medžiagos dalelėms suartėti arčiau viena kitos ir pasiekti didesnę sutankinamumą. Į specialų indą buvo sutalpintas mišinys su reikiamomis medžiagomis ir įdedamas į esančią giratoriaus kamerą. Giratoriui atlikus sutankinimo procesą, bandinys, kurio skersmuo apie 100 mm išimamas iš talpos ir paliekamas toliau hidratuotis.



2 pav. Giratorius

## 2.2. Naudotos pradinės medžiagos.

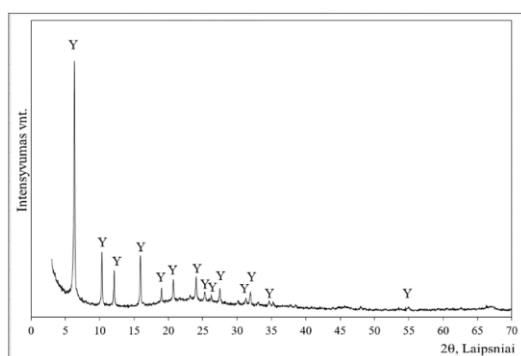
Cementinio akmens bandiniai buvo pagaminti iš įprastinio portlandcemenčio (OPC). Bandinių formavimui buvo naudojamas portlandcementis, kurio tipas CEM I 52,5R. Šių bandinių cheminę sudėtį galima pamatyti 1 lentelėje. Ceolitinė atlieka ir silikagelis buvo naudotas kaip cemento pakaitinės medžiagos (SCM) į cementines sistemas.

Iš cheminės sudėties (žr. 1 lentelę) matyti, kad portlandcemente vyrauja kalcio ir silicio oksidai ir kad ceolito šalutiniame produkte buvo daug silicio dioksido ir aliuminio oksidų. Ceolitinėje atliekoje dominuoja silicio ir aliuminio oksidai. Silikagelis daugiausia sudarytas iš silicio dioksido, kurio kiekis yra virš 76 proc.

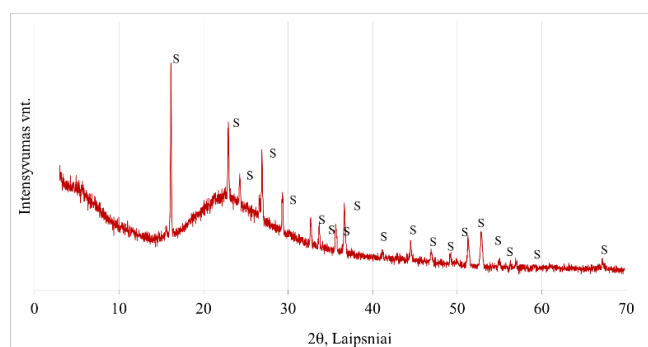
**1 lentelė.** Įprastinio portlandcemenčio, silikagelio ir ceolitinės atliekos cheminė sudėtis, % (pagal rentgeno fluorescencinę (XRF) analizę)

Oksidai ir kiti parametrai	Portlandcementis CEM I 52,5R	Ceolitinė atlieka	Silikagelis
SiO <sub>2</sub>	21.00	35.4	76.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.90	48.77	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.90	1.02	0.01
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	1.63	
TiO <sub>2</sub>	-	3.57	
MgO	2.70	0.44	
CaO	66.00	0.37	0.03
Na <sub>2</sub> O	-	0.312	
SO <sub>3</sub>	3.40	0.07	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.08	0.08
K <sub>2</sub> O	-	-	0.01
Cl	0.06	2.57	0.02
AlF <sub>3</sub>			13.67
Other	-	5.77	9.83
Savitasis paviršiaus plotas (pagal Bleiną), m <sup>2</sup> /g	350.0	142.1	78.1

Remiantis savitojo paviršiaus ploto reikšmėmis galima teigti, kad smulčiausias yra OPC (350 m<sup>2</sup>/g). Dvigubai rupesnė yra ceolitinė atlieka (142 m<sup>2</sup>/g) ir iš stambiausių dalelių yra sudarytas silikagelis, kurio paviršiaus plotas buvo (apie 78 m<sup>2</sup>/g).



(a)



(b)

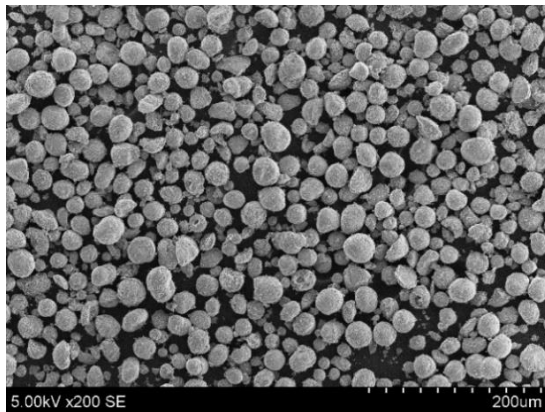
**3 pav.** Ceolitinės atliekos (a) ir silikagelio (b) rentgeno difrakcijos kreivės.

Žymenys:

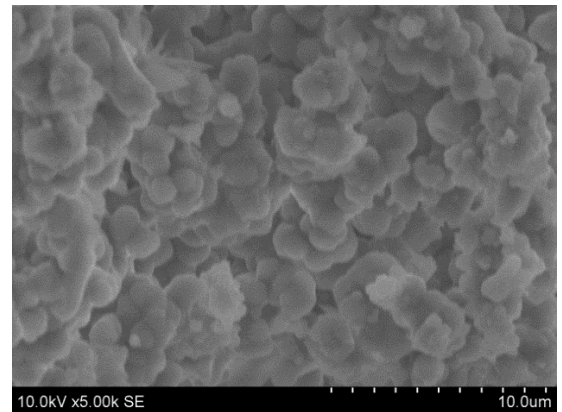
Y yra faujasito tipo ceolitas ( $73\text{-}2312$ )  $\text{H}_7.7\text{Al}_{42.56}\text{Si}_{139}\text{O}_{345.6}$ ;

S yra aliuminio fluorido hidratas  $\text{AlF}_3\cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$  ( $35\text{-}827$ ).

Ceolitinės atliekos mineralinė sudėtis buvo įvertinta remiantis XRD analize (žr. 3 pav.). Šioje medžiagoje vyrauja faujasito tipo ceolitas. Kita cemento pakaitinė medžiaga buvo silikagelis, kurio mineralinėje sudėtyje vyravo aliuminio fluorido hidratas (kristalinis cheminis junginys).



(a)



(b)

**4 pav.** Ceolitinės atliekos (a) ir silikagelio (b) mikrostruktūra naudojant SEM tyrimą

Ceolitinės atliekos mikrostruktūrą sudarė sferinės dalelės (žr. 4 pav. a). Velaskuezas (Velázquez) ir kt. aptiko panašios formos šalutinių ceolito produktų dalelių. Silikagelio mikrostruktūrą sudarė apvalių dalelių ir neapibrėžtos formos kanlomeratų mišinys (žr. 4 pav. b).

Perdirbtų padangų polimerinis pluoštas buvo naudotas kaip užpildas. Jo nuotrauka yra pateikta 5 pav.



**5 pav.** Perdirbtų padangų polimerinio pluošto nuotrauka

Minėto pluošto piltinis tankis buvo apie 45 kg/m<sup>3</sup>. Perdirbtų padangų polimerinis pluoštas buvo gautas perdirbant padangas naudojant mechanizuotą apdirbimą.

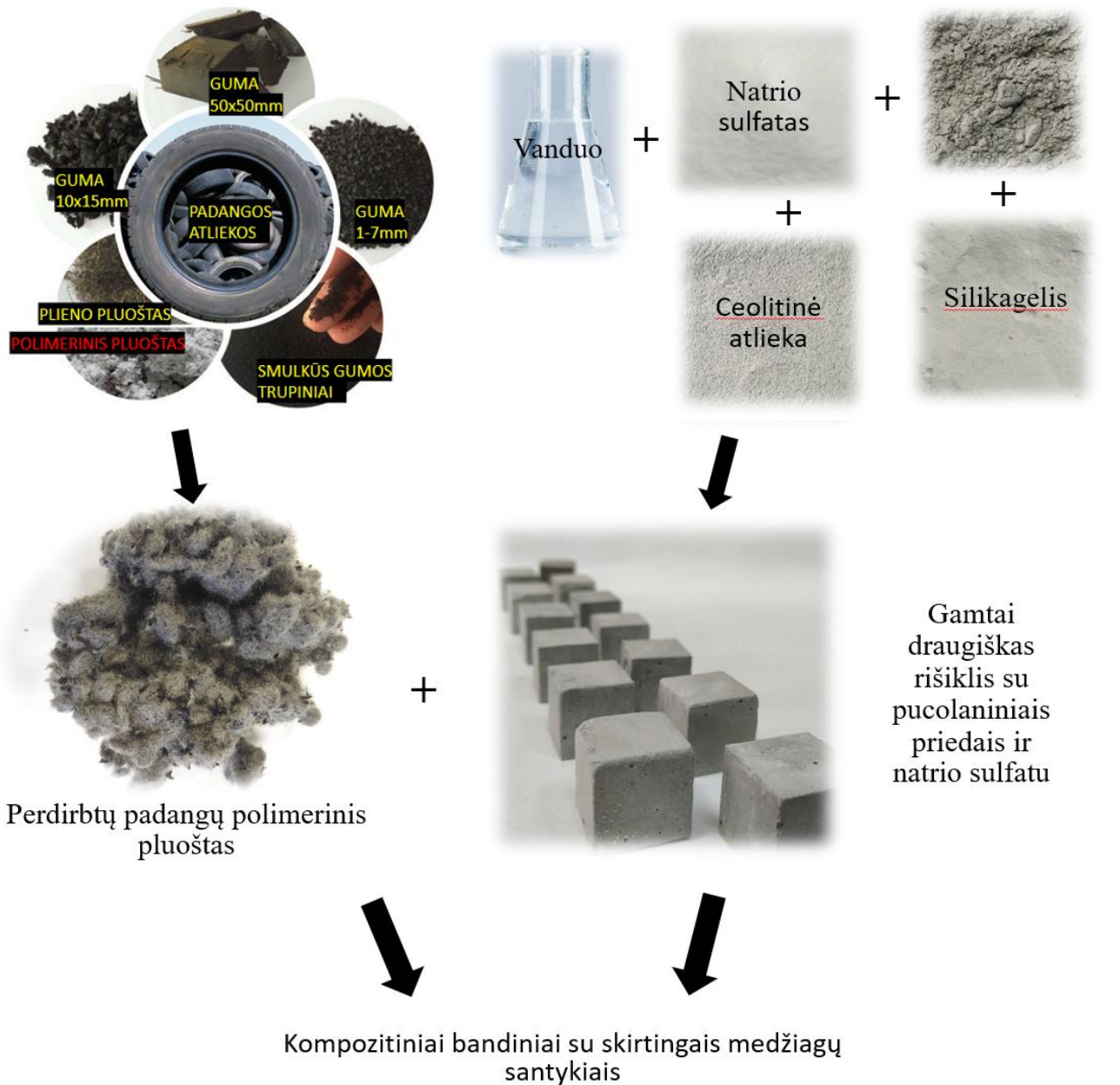
Po mechaninio smulkinimo ir granuliavimo proceso padangos sudedamosios dalys buvo nukreiptos į vibracinius sietus, kurie atskiria gumos granules ir perdirbtų padangų polimerinį pluoštą. Prieš minėtus procesus, plieninės vielos iš mišinio, kurį sudarė gumos granulės ir polimerinis pluoštas, buvo pašalinamos panaudojant magnetus, ir buvo išmestos į atskirą konteinerį tolimesniam atliekų sutvarkymui. Minėtasis polimerinis pluoštas dažniausiai būna labai užterštas likusiomis gumos dalelėmis, įterpus šį pluoštą į betoną, šios dalelės gali paveikti betono charakteristikas [24].

Cheminis priedas – natrio sulfatas (sieros rūgšties natrio druska). Bespalviai kristalai. Medžiagos lydymosi temperatūra 884 °C, tankis – 2698 kg/m<sup>3</sup>. Tai vandenyje tirpstanti medžiaga. Žemesnėje negu 32 °C temperatūroje iš vandeninio tirpalo kristalizuojasi kristalohidratų (Glauberio druskos) pavidalu. Naudoto cheminio *Lakewood* firmos (USA) priedo grynumas daugiau kaip 99 proc.



# Darbo schema

Padangų polimerinio pluošto ir aplinkai draugiškų rišiklių kompozitiniai bandiniai



6 pav. Darbo schema

### 3. Rezultatai ir diskusija

#### 3.1. Padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitiniai bandiniai

Buvo suformuoti kompozito bandiniai naudojant portlandcementį CEM I 42,5 R, kaip rišiklį matricai sudaryti. Kaip kompozitą armuojanti medžiaga buvo naudojamas polimerinis pluoštas gautas iš perdirbtų padangų. Kompozitinių bandinių pradinių medžiagų sudėtys pateiktos 2 lentelėje. Visais atvejais buvo naudotas vienodas pluošto kiekis (100 g), tačiau keistas rišiklio kiekis nuo 100 g iki 600 g.

**2 lentelė.** Perdirbtų padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių pradinių medžiagų kiekiai

Bandinio Nr.	Portlandcemenčio (CEM I 42,5 R) kiekis, kg	Perdirbto polimerinio pluošto kiekis, kg	Portlandcemenčio ir polimerinio pluošto santykis	H <sub>2</sub> O kiekis, kg
1.	0,100	0,100	1	0,65
2.	0,200	0,100	2	0,89
3.	0,400	0,100	4	0,110
4.	0,500	0,100	5	0,152
5.	0,600	0,100	6	0,165

Bandinių formavimas vyko sekančia seka. Iš pradžių buvo pasverti reikiami pradinių medžiagų kiekiai. Medžiagos buvo sumaišytos ir užpiltos reikiamu vandens kiekiu. Iš homogeniškos masės buvo formuoti cilindro formos bandiniai, naudojant specialų formavimo būdą (giratorių). Cilindro skersmuo 100 mm. Formuojant buvo naudojamas giratorius, kurio suspaudimo slėgis buvo 40 kPa. Suformuotų bandinių nuotraukos pateikiamos 7 paveikslėlyje. Šiuo atveju buvo suformuoti 5 rūšių bandiniai (2 lentelė).



**7 pav.** Suformuotų padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių nuotrauka

Bandiniai buvo kietinami drėgnoje aplinkoje 28 paras, kambario temperatūroje. Po 28 parų buvo nustatytas tankis – žr. 3 lentelę. Tankis svyravo nuo 343 iki 1044 kg/m<sup>3</sup>.

**3 lentelė.** Perdirbtų padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių tankiai ir stiprumo bandymo rezultatai

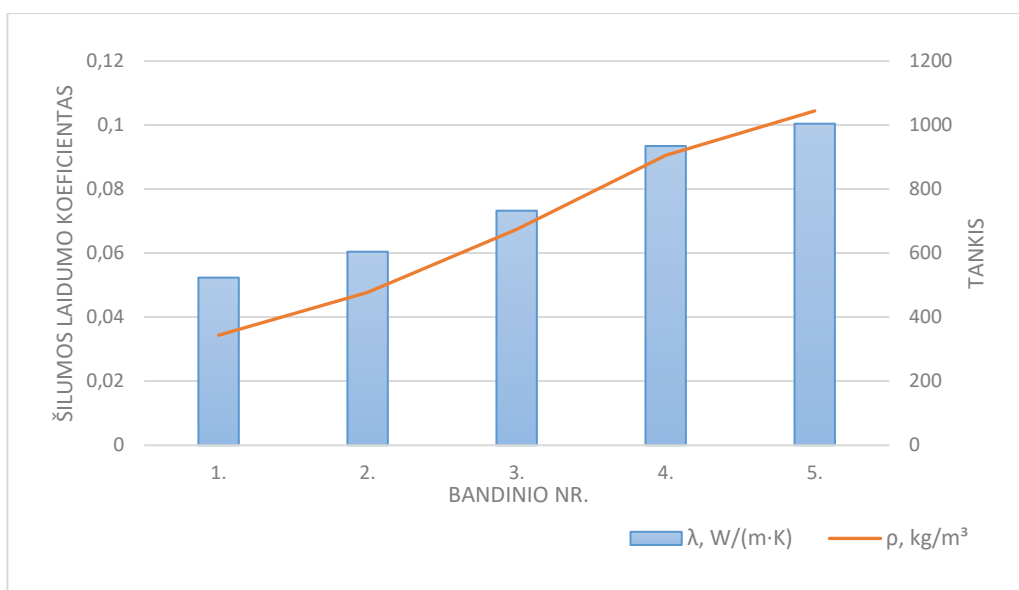
<b>Bandinio Nr.</b>	<b>Svoris, kg</b>	<b>Bandinio aukštis, mm</b>	<b>Bandinio skersmuo, mm</b>	<b>Bandinio tankis, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Ardomoji jėga, prie kurios buvo pasiekta 10 proc. santykinė deformacija</b>	<b>Stipris, MPa</b>
1.	0,256	95	100	343,55	Nustatyti nepavyko	-
2.	0,371	99	100	477,49	Nustatyti nepavyko	-
3.	0,573	102	103	674,41	0,185 kN	0,024
4.	0,689	97	100	905,18	0,500 kN	0,064
5.	0,787	96	100	1044,40	0,805 kN	0,103

Gniuždymo stipris nustatomas pagal LST EN 826, esant 10 proc. santykinei deformacijai nuo pradinio bandinio aukščio su sąlyga, kad iki šios deformacijos bandinys nesuyra ir nepasiekia takumo ribos. Bandinys gniuždomas iki 10 proc. santykinės deformacijos ir esant šiai deformacijai yra fiksuojama ardomoji jėga  $F$ . Jeigu ardomoji jėga sumažėja dar nepasiekus 10 proc. santykinės deformacijos, tai apskaičiuojant gniuždomąjį stiprį turi būti imama mažesnė ardomosios jėgos  $F$  reikšmė.



**8 pav.** Bandinio stiprumo nustatymo su presu ir deformacijų matuokliu proceso nuotrauka

Taip pat buvo atliktas sąlyginis medžiagos šilumos laidumo bandymas. Šilumos laidumo koeficientas nėra tikslus, galime tik palyginti reikšmes tarpusavyje, priklausomai nuo tankio – žr. 9 paveikslėlį.



**9 pav.** Padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių tankio priklausomybė nuo šilumos laidumo koeficiento

### 3.2. Kompozitinių bandinių rišiklių tyrimas naudojant cemento pakaitines medžiagas

Šiais laikais ekologija yra labai svarbi tema, todėl turime rasti būdą kaip tausoti gamtą t.y. perdirbti medžiagas ir panaudoti jas antrą kartą, sunaudoti gamyboje gaunamus subproduktus ir kt. Šiame skyriuje buvo tiriamas kompozicinio bandinio rišiklis. Kad gautume didesnę aplinkai draugišką rišiklį buvo pakeista kompozitinių bandinių rišiklio sudėtis.

Dalis cemento buvo pakeista 2 rūšių pucolaninėmis medžiagomis. Faujasitu (sintetinis ceolitas) ir technogeniniu silikageliu, kuris buvo gautas iš trąšų gamyklos. Silikagelyje vyrauja amorfinis SiO<sub>2</sub>, užterštas fluoro junginiais. Vaičiukynienė ir kiti [33] tyrinėjo silikagelio panaudojimą ir įtaką cementinio akmens bandiniams, buvo analizuoti duomenys kai silikagelio kiekis padidėja nuo 0 % iki 35 % cementiniuose bandiniuose. Bandiniuose, kuriuose yra 10 % silikagelio priedo, gniuždymo stipris padidėjo apie 8 %. Vien silikagelio kaip pucolaninės medžiagos cementinėse sistemose naudoti negalima, nes fluoro junginiai stabdo cemento hidratacijos procesus. Todėl šalia silikagelio buvo naudotas kartu ir faujasitas. Blim nagrinėjo klinoptiolito – gamtinio ceolito, įtaką cemento mišiniams. Buvo nustatyta, kad klinoptiolito turinčių skiedinių gniuždymo ir lenkimo stipris buvo didesnis nei kontrolinių mišinių [34]. Taip pat Yilmaz ir kiti [35] pastebėjo, kad plastiškumo laikas pailgėja priklausomai nuo įmaišyto klinoptiolito kiekio ir kad ankstyvieji stiprumai keičiasi pagal Blaine vertes. Vaičiukynienė ir kiti [36] taip pat įrodė, kad ceolitas cementinėse sistemose absorbuoja fluoro junginius ir tokiu būdu eliminuoja kenksmingą poveikį cemento hidratacijai.

Šiame tyrime tirtų rišiklių medžiagų kiekiai pateikiami 4 lentelėje. Buvo tirta 13 bandinių tipų keičiant pucolaninį kiekį nuo 5 iki 50 procentų. Kaip pucolanas buvo naudotas ceolito faujasito ir silikagelio, užteršto fluoro junginiais, mišinys.

**4 lentelė.** Cementinio akmens bandinių pradinių medžiagų kiekiai su cemento pakaitinėmis medžiagomis

Bandinio Nr.	Cemento kiekis, g	Silikagelis, g	Ceolitas, g	Natrio sulfatas, g	Vandens ir kietų medžiagų santykis
1.	100	0	0	0	0,49
2.	95	2,5	2,5	0	0,49
3.	95	2,5	2,5	0,25	0,49
4.	90	5	5	0	0,49
5.	90	5	5	0,25	0,49
6.	80	10	10	0	0,49
7.	80	10	10	0,25	0,49
8.	70	15	15	0	0,49
9.	70	15	15	0,25	0,48
10.	60	20	20	0	0,49
11.	60	20	20	0,25	0,50
12.	50	25	25	0	0,55
13.	50	25	25	0,25	0,54

Taip pat rišiklio kompozicijose buvo nagrinėjama natrio sulfato įtaka, kaip cemento hidratacijos greitiklio. Kiti autoriai taip pat tyrė natrio sulfato priedo įtaką cementinėms sistemoms. Mota ir kiti darbe [37] paaiškina Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> įtaką cemento hidratacijos kinetikai ir mikrostruktūriniam vystymuisi:

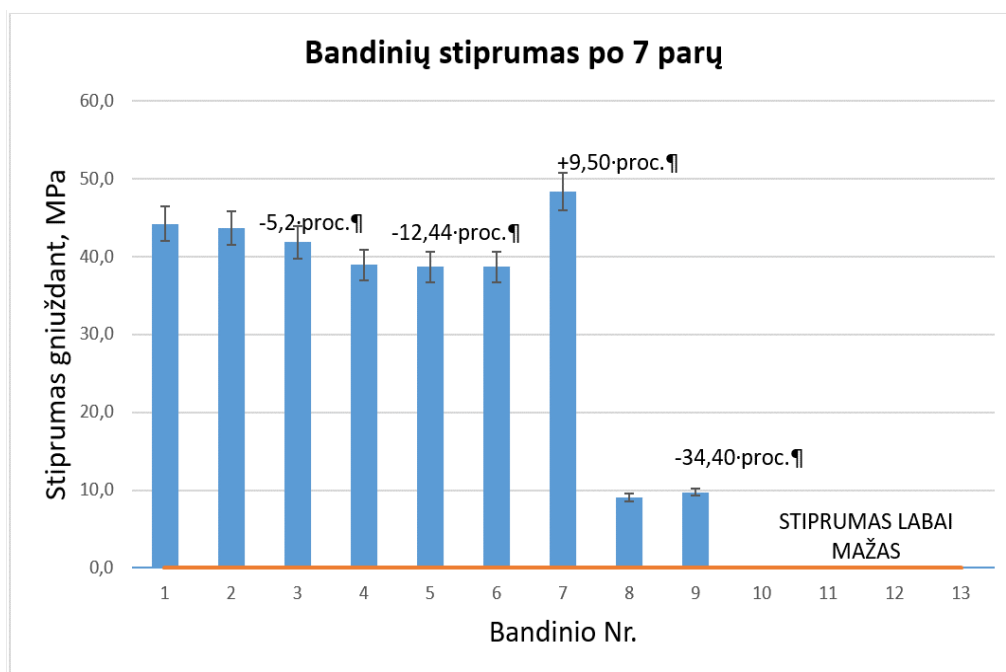
natrio sulfatas pagreitina hidrataciją ir stiprumo vystymąsi pirmosiomis valandomis, bet vėliau mažina stiprumo reikšmes. Taip pat  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  skatina didesnio tūrio hidratų, ypač etringito, susidarymą. Didesnis hidratų kiekis gali geriau užpildyti tuščią erdvę rišiklio sistemoje. Pridėto natrio sulfato poveikį taip pat nagrinėjo ir Fu su kitais [38], buvo ištirtos ankstyvos hidratacijos reakcijos ir gaunamas gniuždymo stiprumas. Įrodyta, kad ankstyvas stiprumo padidėjimas esant  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  atsirado dėl padidėjusios alitinės hidratacijos ir padidėjusio šlako tirpimo derinio. Nustatyta, kad natrio sulfatas yra pranašesnis už alternatyvius aktyvatorius cemento rišiklyje.

Guo Li ir kt. [39] atliko greito užšaldymo-atšildymo ciklo eksperimentus su betono bandiniais, kuriuose buvo 1 % ir 5 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Mėginiai buvo vizualiai apžiūrėti ir įvertinami, o masės nuostoliai ir santykinis dinaminis elastingumo modulis buvo reguliariai matuojami. Po užšalimo-atšildymo ciklo eksperimento mėginams buvo atliktas SEM stebėjimas ir rentgeno spindulių difrakcijos analizė. Bandiniuose su didesniu  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kiekiu buvo pastebimi dideli pažeidimai. Korozijos produktai  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tirpalo užšalimo ir atšildymo cikle daugiausia yra etringitas ir gipsas. Didinant  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kiekį bandiniuose, etringito susidarymas palaipsniui mažėja, o gipso susidarymas palaipsniui didėja.

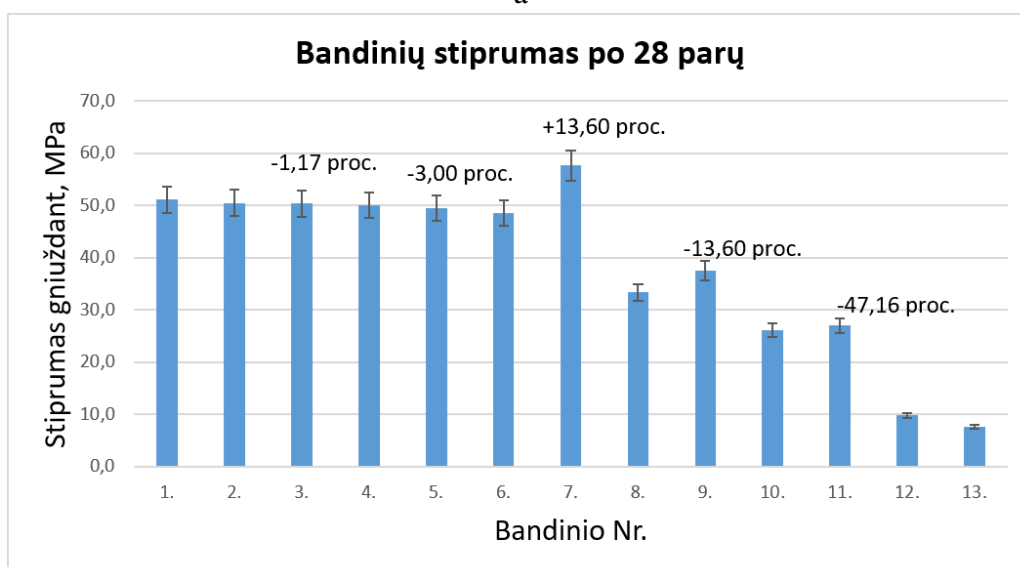
Nedaug tyrimų buvo atlikta apie chlorido ir sulfato tirpalų įtaką, pucolaniniu pagrindu pagamintam cementiniam gumuotam betonui. Šiame tyrime [40] įvertinamos gumuoto betono mechaninės ir ilgaamžiškumo charakteristikos ir palyginamos su įprastu betonu. Dalinai smulkus betono užpildas bandiniuose buvo pakeistas skirtingais gumos trupinių kiekiais. Remiantis rentgeno spindulių difrakcija, buvo teigiama, kad mėginiai išliko kristalinės formos. Taip pat mėginiai buvo panardinti į skirtingus tirpalus:  $\text{NaCl}$  (natrio chlorido),  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (natrio sulfato) ir  $\text{MgSO}_4$  (magnio sulfato). Buvo pastebėta, kad į  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tirpalą panardinti bandiniai prarado mažiau svorio ir gniuždymo stiprumo nei bandiniai, panardinti į  $\text{MgSO}_4$  tirpalą. Betono gniuždymo stiprio nuostoliai yra 1,86 %, 3,57 % ir 4,82 % panardinus į  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ir  $\text{MgSO}_4$  tirpalus atitinkamai. Taip pat pucolaniniu pagrindu pagamintas cementas su gumos priemaišomis gali ilgesnį laiką atsispirti chlorido ir sulfato tirpalams.

Taigi, apžvelgus naujausią mokslinę literatūrą galima teigti, kad nėra duomenų susijusių su cementiniu akmeniu su silikageliu ir ceolitu bei natrio sulfato kiekiu. Minėtas cheminis junginys buvo naudotas kaip hidratacijos greitiklis ankstyvajame hidratacijos laikotarpyje. Atlikus stiprių gniuždant duomenų analizę (žr. 10 paveikslą), nustatyta, kad natrio sulfato didžiausias teigiamas poveikis buvo naudojant 20 proc. pucolaninio mišinio, sudaryto iš ceolito ir silikagelio.

Po 7 parų hidratacijos portlandcementį keičiant cemento pakaitinėmis medžiagomis bandinių stipris gniuždant laipsniškai mažėjo didinat cemento pakaitines medžiagas sistemoje (žr. 10 pav. a). Bandiniuose, kuriuose buvo didelis kiekis nuo 40 iki 50 proc. cemento pakaitinių medžiagų (bandiniai Nr. 10 – 13) stipris gniuždant buvo labai mažas, t. y. artimas nuliui. Svarbu pabrėžti, kad bandinys Nr. 7, kur buvo 20 proc. cemento pakaitinių medžiagų ir natrio sulfato priedas buvo naudotas, turėjo didesnę apie 9,5 proc. stiprumą gniuždant negu kontrolinis bandinys, pagamintas tik su portlandcemenčiu.



a



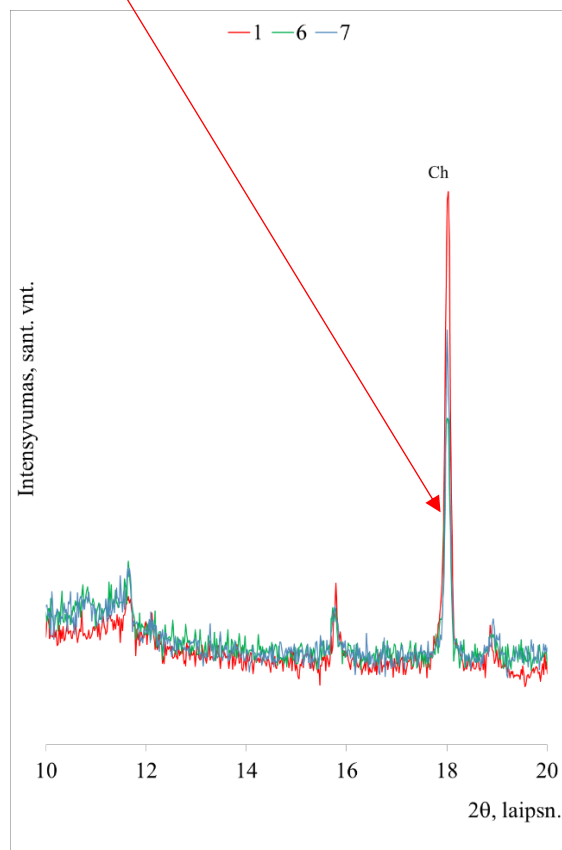
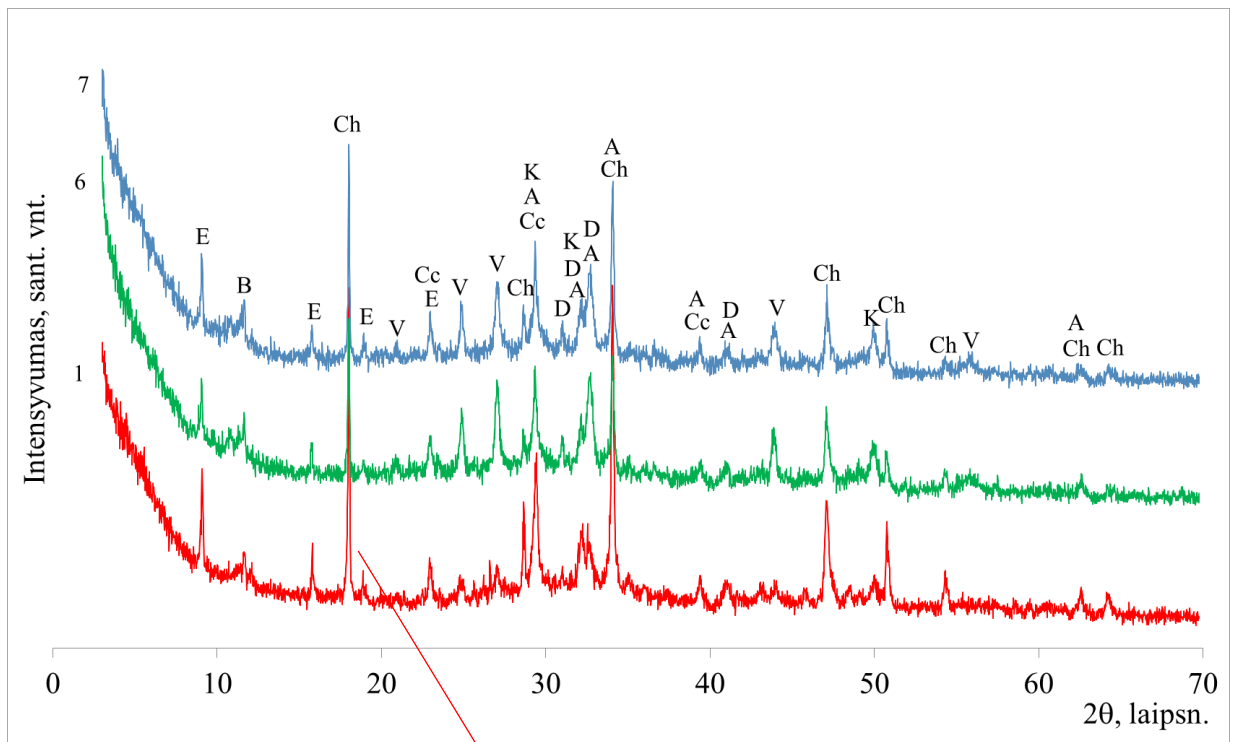
b

**10 pav.** Cementinio akmens su pucolaninėmis medžiagomis stipris gniuždant po 7 (a) ir po 28 parų (b).

Grafikuose pateikti stulpeliai Nr. 3, 5, 7, 9, 11, 13 – bandiniai kuriuose buvo panaudotas natrio sulfatas.

Panaši stiprumo gniuždant augimo tendencija ir bandiniuose po ilgesnio hidratacijos laikotarpio, tai yra po 28 parų. Į cementinę sistemą įterpus nedidelį kiekį (bandiniai Nr. 1 – 6) cemento pakaitinių medžiagų buvo nustatytos panašios stiprio gniuždant vertės kaip ir kontrolinio bandinio. Toliau didinant cemento pakaitines medžiagas sistemoje stipris gniuždant mažėjo (10 pav., a).

Natrio sulfato priedo kiekis tirtoje sistemoje su iki 20 proc. cemento pakaitinių medžiagų neturėjo ryškios įtakos stiprumo gniuždant vertėmės. Išimtis buvo bandinys Nr. 7 kur stiprumas gniuždant išaugo 13,6 proc. Taip pat nedidelis stiprumo padidėjimas buvo nustatytas bandiniuose Nr. 9 ir Nr. 11



**11 pav.** Cementinio akmens su pucolaninėmis medžiagomis bandinių mineralinė sudėtis naudojant XRD analizę.

Žymenys: Ch yra kalcio hidroksidas  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , V yra vateritas  $\text{CaCO}_3$ , Cc yra kalcitas  $\text{CaCO}_3$ . E yra etringitas  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , A yra alitas  $\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$ , D yra larnitas  $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ , K yra kalcio silikato hidratas  $\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$



Tam kad būtų galima paaiškinti bandinio Nr. 7 stiprumo padidėjimą buvo atlikta rentgenografinė analizė, kuri parodo hidratuotų bandinių mineralinę sudėtį. Buvo iširta mineralinė sudėtis trijų bandinių: kontrolinio bandinio (Nr.1), t. y. be cemento pakaitinių medžiagų, bandinio su 20 proc. cemento pakaitinių medžiagų (Nr. 6) ir tokia pati sudėtis tik dar įdėtas natrio sulfato priedas (Nr.7). Nustatyta, kad po 28 parų hidratacijos visuose tirtuose bandiniuose susidarė tokie patys hidratacijos naujadarai: kalcio silikato hidratas  $\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_3 \cdot 5\text{xH}_2\text{O}$ , kalcio hidroksidas  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , vateritas  $\text{CaCO}_3$ , kalцитas  $\text{CaCO}_3$ , etringitas  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ . Papildomai nustatyti ir pagrindiniai cemento nepasihidratavę mineralai: alitas ir larnitas.

Remiantis šia analize, nustatyta, kad pridėjus cemento pakaitinių medžiagų sistemoje sumažėjo kalcio hidroksido ir identifikuotos šiam mineralui būdingos smailės (apie 18 laipsnių) sumažėjimas.

Tai yra susiję su praskiedimo efektu, kada sistemoje yra mažesnis kiekis portlandcemenčio (lyginant bandinį Nr. 1 su bandiniais Nr. 6 ir 7). Reikia pabrėžti, kad bandinyje Nr. 7 buvo nustatytas didesnis kalcio hidroksido kiekis ir tai gali būti paaiškinama cemento mineralų greitesne hidratacija ir cemento pakaitinių medžiagų tirpimo sistemoje. Panašūs rezultatai buvo gauti ir aprašyti bei kitų autorių [37].

### 3.3. Padangų polimerinio pluošto ir aplinkai draugiškų rišiklių kompozitiniai bandiniai

Šiame skyriuje yra nagrinėjami padangų polimerinio pluošto ir aplinkai draugiško rišiklio bandiniai, kur dalis cemento buvo pakeista pucolaniniais priedais ir įterptas greitiklis – natrio sulfatas. Remiantis 3.2 skyriaus duomenimis kaip rišiklis buvo pasirinkta sistema sudaryta iš 80 proc. protlandcemenčio, 20 proc. silikagelio ir faujasito bei natrio sulfato priedo, kaip hidratacijos intensifikatoriaus. 12 paveikslėlyje matote suformuotų bandinių nuotrauką, suformuotų bandinių medžiagų santykiai ir formos buvo identiškos prieš tai formuotiems bandiniams tik iš padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio.



12 pav. Padangų polimerinio pluošto ir aplinkai draugiškų rišiklių, skirtingų medžiagų santykių, kompozitiniai bandiniai

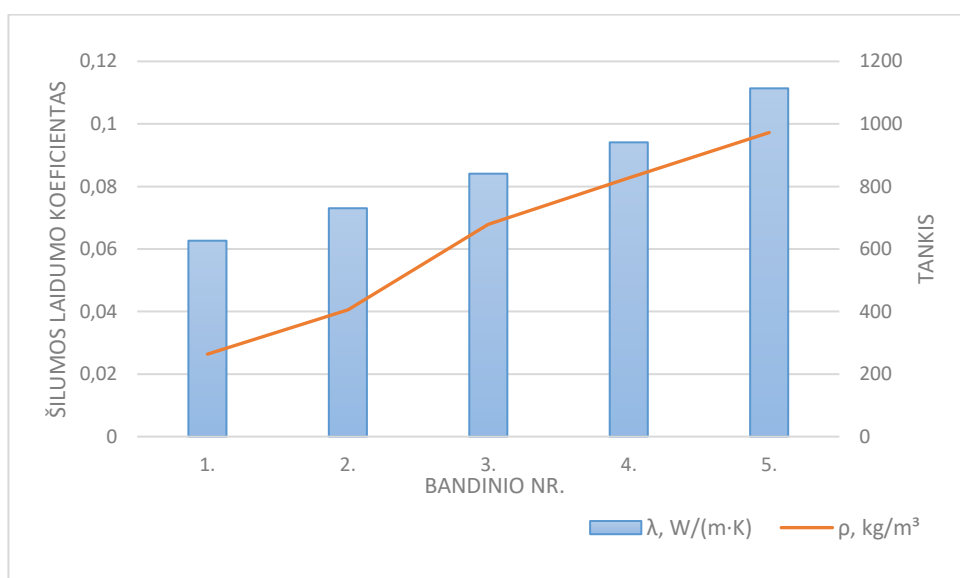
Taigi buvo pakartojamas analogiškas tyrimo procesas visiems bandiniams kaip ir anksčiau tirtiems bandiniams su įprastiniu portlandcemenčiu. Gautų rezultatų lentelės pateikiamos apačioje (žr. 5 ir 6 lenteles).

**5 lentelė.** Perdirbtų padangų polimerinio pluošto ir įprastinio portlandcemenčio kompozitinių bandinių pradinių medžiagų kiekiai

Bandinio Nr.	Cemento kiekis, kg	Perdirbto polimerinio pluošto kiekis, kg	Silikagelis, kg	Ceolitas, kg	Natrio sulfatas, g	H <sub>2</sub> O kiekis, kg
1.	0,080	0,100	0,010	0,010	0,25	0,068
2.	0,160	0,100	0,020	0,020	0,5	0,080
3.	0,320	0,100	0,040	0,040	1	0,110
4.	0,400	0,100	0,050	0,050	1,25	0,132
5.	0,480	0,100	0,060	0,060	1,50	0,160

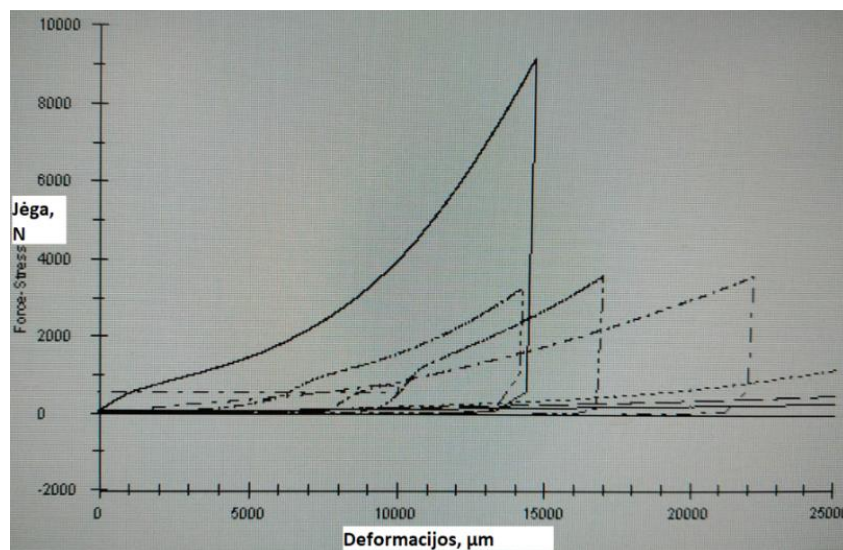
**6 lentelė.** Pagamintų bandinių su pucolaniniais priedais ir natrio sulfatu charakteristikų lentelė ir stiprumo bandymų rezultatai

Bandinio Nr.	Svoris, kg	Bandinio aukštis, mm	Bandinio skersmuo, mm	Bandinio tankis, kg/m <sup>3</sup>	Ardomoji jėga, prie kurios buvo pasiekta 10 proc. santykinė deformacija	Stipris, MPa
1.	0,210	100	100	263,71	Nustatyti nepavyko	-
2.	0,324	99	100	405,54	Nustatyti nepavyko	-
3.	0,542	101	100	678,73	0,8 kN	0,102
4.	0,661	99	100	827,25	1,57 kN	0,199
5.	0,777	100	100	972,42	4,05 kN	0,516



**13 pav.** Padangų polimerinio pluošto ir aplinkai draugiško portlandcemenčio kompozitinių bandinių tankio priklausomybė nuo sąlyginio šilumos laidumo koeficiento

Atlikus duomenų analizę galime pamatyti, kad bandiniai su aplinkai draugišku rišikliu turėjo didesnę stiprumą, lyginant su įprastiniais bandiniais. Viena iš priežasčių, tai stipresnio rišiklio panaudojimas kompozitinėje medžiagoje. Kitos charakteristikos, kaip šilumos laidumas kito neženkiai (žr. 13 paveikslą).



**14 pav.** Tiriamų kompozitinių bandinių aukščio pokyčio (deformacijos) priklausomybė nuo veikiančios jėgos

Atsižvelgus į rodiklius tokius kaip medžiagos masė, tankis, šilumos laidumas, stiprumas ir kt. bei sunaudotų medžiagų kiekius galime padaryti išvadą, kad optimalus buvo bandinys buvo Nr. 3. Bandinio ardomoji jėga, prie kurios buvo pasiekta 10 proc. santykinė deformacija, lyginant su bandiniu, kur rišiklis buvo įprastas portlandcementis, padidėjo. Taigi galime teigti, kad šio bandinio stiprumas padidėjo, nors tankis buvo netgi šiek tiek mažesnis. Tai turėtų būti susiję su geresnėmis rišiklio mechaninėmis savybėmis.

## Išvados

1. Atlikus literatūros analizę, buvo padaryta išvada, kad padangų atliekų utilizavimo galimybės yra labai plačios ir jos gali būti panaudojamos įvairiose srityse. Atliekų įterpimas į statybinių medžiagų pasiūlą yra vienas iš sprendimų kaip tvariai panaudoti atliekas ir sumažinti aplinkos užterštumą.
2. Suformavus kompozitinius bandinius su aplinkai draugišku rišikliu, buvo gauti kompozitiniai bandiniai su panašiu tankiu, lyginant su bandiniais, kurie buvo suformuoti su įprastu portlandcemenčiu. Tankiai svyravo nuo 343 iki 1044 kg/m<sup>3</sup>. Įprastinių bandinių, kurių stiprumą pavyko nustatyti, stiprių reikšmės buvo 0,024 MPa ; 0,064 MPa ; 0,103 MPa. O bandinių su aplinkai draugišku rišikliu, analogiškai : 0,102 MPa; 0,199 MPa ; 0,516 MPa.
3. Tiriant aplinkai draugišką rišiklį, nustatyta, kad optimali rišiklio sudėtis buvo Nr. 7 : 80 proc. portlandcemenčio, 20 proc. pucolaninių priedų ir 0,25 proc. natrio sulfato. Šios sudėties rišiklio stiprumas išaugo +13,60 proc. lyginant su kontroliniais bandiniais.
4. Atsižvelgus į visas išanalizuotas charakteristikas ir reikšmes, galime priimti, kad optimalus kompozitinis bandinys buvo su aplinkai draugišku rišikliu Nr. 3. Kurio rišiklio sudėtį sudarė 80 proc. portlandcemenčio, 20 proc. pucolaninių priedų ir 0,25 proc. natrio sulfato nuo visos masės. O pačio bandinio medžiagų santykis buvo 4:1. 0,400 kg rišiklio ir 0,100 kg pluošto.
5. Nagrinėtą kompozitą kaip statybinę medžiagą galima panaudoti ten, kur didelis stiprumas ir šilumos laidumas nėra pagrindinis kriterijus. Medžiaga puikiai tiktų kaip grindų apšiltinimo sluoksnis, kur didelių apkrovų poveikis statinyje mažai tikėtinas. Gaminant tokią kompozitinę medžiagą ir panaudojant statyboje būtų sumažinamas atliekų poveikis žmonėms ir aplinkai.

## Literatūros sąrašas

1. OIKONOMOU, Nikolaos; MAVRIDOU, Sofia. The use of waste tyre rubber in civil engineering works. In: *Sustainability of construction materials*. Woodhead Publishing [interaktyvus]., 2009 [žiūrėta 2021-09-20]. pp. 213-238. Prieiga per: <https://doi.org/10.1533/9781845695842.213>.
2. SIDDIKA, Ayesha, et al. Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]., 2019 [žiūrėta 2021-09-20]. 224: 711-731. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>.
3. GRINYS, Audrius; SIVILEVIČIUS, Henrikas; DAUKŠYS, Mindaugas. Tyre rubber additive effect on concrete mixture strength. *Journal of civil engineering and management* [interaktyvus]., 2012 [žiūrėta 2021-09-20]. 18.3: 393-401. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.693536>.
4. SERDAR, Marijana, et al. Possibilities of use of products from waste tyre recycling in concrete industry. *Journal of Applied Engineering Science* [interaktyvus]., 2014 [žiūrėta 2021-09-20]. 12.1. Prieiga per: <https://doi.org/10.5937/jaes12-5671>
5. GIRSKAS, Giedrius; NAGROCKIENĖ, Džigita. Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]., 2017 [žiūrėta 2021-09-20]. 140: 36-42. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.107>
6. VALENTE, Marco; SIBAI, Abbas. Rubber/crete: Mechanical properties of scrap to reuse tire-derived rubber in concrete; A review. *Journal of applied biomaterials & functional materials* [interaktyvus]., 2019 [žiūrėta 2021-09-20]. 17.1\_suppl: 2280800019835486. Prieiga per: <https://doi.org/10.1177/2280800019835486>
7. SKRIPKIŪNAS, Gintautas; GRINYS, Audrius; MIŠKINIS, Kęstutis. Damping properties of concrete with rubber waste additives. *Materials Science (Medžiagotyra)* [interaktyvus]., 2009 [žiūrėta 2021-09-20]. 15.3: 266-272. Prieiga per: <https://matsc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/26160>
8. LI, Danda, et al. Review of the performance of high-strength rubberized concrete and its potential structural applications. *Advances in Civil Engineering Materials* [interaktyvus]., 2016 [žiūrėta 2021-09-20]. 5.1: 149-166. Prieiga per: <https://doi.org/10.1520/ACEM20150026>
9. THOMAS, Blessen Skariah; GUPTA, Ramesh Chandra. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]., 2016 [žiūrėta 2021-09-20]. 54: 1323-1333. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>
10. SERDAR, Marijana, et al. Special purpose concrete products from waste tyre recyclates. *Gradėvinar* [interaktyvus]., 2013 [žiūrėta 2021-09-20]. 65.09.: 793-801. Prieiga per: <https://doi.org/10.14256/JCE.821.2013>
11. PACHECO-TORGAL, F.; DING, Yining; JALALI, Said. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An

- overview. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*, 2012 [žiūrėta 2021-09-20]. 30: 714-724. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047>
12. BRAVO, Miguel; DE BRITO, Jorge. Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production [interaktyvus]*, 2012 [žiūrėta 2021-09-20]. 25: 42-50. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.066>
  13. HERRERA-SOSA, Eduardo Sadot, et al. Recovery and modification of waste tire particles and their use as reinforcements of concrete. *International Journal of Polymer Science [interaktyvus]*, 2015 [žiūrėta 2021-09-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1155/2015/234690>
  14. BARBUTA, Marinela, et al. Effects of tire wastes on the mechanical properties of concrete. *Procedia Engineering [interaktyvus]*, 2017 [žiūrėta 2021-09-20]. 181: 346-350. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.399>
  15. MALAIŠKIENĖ, Jurgita; NAGROCKIENĖ, Džigita; SKRIPKIŪNAS, Gintautas. Possibilities to use textile cord waste from used tires for concrete. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management [interaktyvus]*, 2015 [žiūrėta 2021-09-20]. 23.3: 183-191. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/16486897.2015.1057514>
  16. SHU, Xiang; HUANG, Baoshan. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials [interaktyvus]*, 2014 [žiūrėta 2021-09-20]. 67: 217-224. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>
  17. YU, Huayang, et al. Effect of mixing sequence on asphalt mixtures containing waste tire rubber and warm mix surfactants. *Journal of Cleaner Production, [interaktyvus]*, 2020 [žiūrėta 2021-09-20]. 246: 119008. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119008>
  18. YU, Hua-yang, et al. Warm asphalt rubber: A sustainable way for waste tire rubber recycling. *Journal of Central South University, [interaktyvus]*, 2020 [žiūrėta 2021-09-20]. 1-22. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4467-y>
  19. GUPTA, Trilok; SHARMA, Ravi K.; CHAUDHARY, Sandeep. Influence of waste tyre fibers on strength, abrasion resistance and carbonation of concrete. *Scientia Iranica [interaktyvus]*, 2015 [žiūrėta 2021-09-20]. 22.4: 1481-1489. Prieiga per: [http://scientiairanica.sharif.edu/article\\_1970.html](http://scientiairanica.sharif.edu/article_1970.html)
  20. BANTHIA, Nemkumar; ONUAGULUCHI, Obinna. Recycling Scrap Tire-Derived Fibers in Concrete. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering [interaktyvus]*, 2021 [žiūrėta 2021-09-20]. 1-11. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s41403-021-00257-4>
  21. ONUAGULUCHI, Obinna; BANTHIA, Nemkumar. Value-added reuse of scrap tire polymeric fibers in cement-based structural applications. *Journal of cleaner production [interaktyvus]*, 2019 [žiūrėta 2021-09-20]. 231: 543-555. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.225>
  22. GUPTA, Trilok, et al. Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber. *Construction and Building*

- Materials [*interaktyvus*], 2017 [žiūrėta 2021-09-20]. 137: 35-45. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.065>
23. GARRICK, Gregory Marvin. Analysis and testing of waste tire fiber modified concrete [*interaktyvus*], 2005 [žiūrėta 2021-09-20]. Prieiga per: [https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool\\_theses/217](https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/217)
  24. BARIČEVIĆ, Ana, et al. Influence of recycled tire polymer fibers on concrete properties. Cement and Concrete Composites [*interaktyvus*], 2018 [žiūrėta 2021-09-20]. 91: 29-41. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.04.009>
  25. ONUAGULUCHI, Obinna; BANTHIA, Nemkumar. Durability performance of polymeric scrap tire fibers and its reinforced cement mortar. Materials and Structures [*interaktyvus*], 2017 [žiūrėta 2021-09-20]. 50.2: 1-10. Prieiga per: <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1025-7>
  26. SERDAR, Marijana, et al. Shrinkage behaviour of fibre reinforced concrete with recycled tyre polymer fibres. International Journal of Polymer Science [*interaktyvus*], 2015 [žiūrėta 2021-09-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1155/2015/145918>
  27. BARICEVIC, Ana, et al. Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete. Construction and Building Materials [*interaktyvus*], 2018 [žiūrėta 2021-09-20]. 176: 135-144. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.229>
  28. CHEN, Meng; ZHONG, Hui; ZHANG, Mingzhong. Flexural fatigue behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete. Cement and Concrete Composites [*interaktyvus*], 2020 [žiūrėta 2021-09-20]. 105: 103441. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103441>
  29. CHEN, Meng, et al. Behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete at elevated temperatures. Cement and Concrete Composites [*interaktyvus*], 2021 [žiūrėta 2021-09-20]. 104257. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104257>
  30. BARICEVIC, Ana, et al. Properties of concrete reinforced with recycled tyre polymer fibers. In: Proceedings of the 1st International Conference COMS\_2017, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zadar, Croatia [*interaktyvus*], 2017 [žiūrėta 2021-09-20]. p. 871-877. Prieiga per: [https://www.bib.irb.hr/875235/download/875235.Baricevic\\_et\\_al\\_Properties\\_of\\_Concrete\\_Reinforced\\_with\\_Recycled\\_Tyre\\_Polymer\\_Fibers.pdf](https://www.bib.irb.hr/875235/download/875235.Baricevic_et_al_Properties_of_Concrete_Reinforced_with_Recycled_Tyre_Polymer_Fibers.pdf)
  31. FIGUEIREDO, Fabio P., et al. Fire protection of concrete tunnel linings with waste tyre fibres. Procedia engineering. [*interaktyvus*], 2017 [žiūrėta 2021-09-20]. 210: 472-478. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.103>
  32. LANDI, Daniele, et al. Reuse scenarios of tires textile fibers: An environmental evaluation. Procedia Manufacturing [*interaktyvus*], 2018 [žiūrėta 2021-09-20]. 21: 329-336. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.128>



33. VAIČIUKYNIENĖ, Danutė, et al. Effect of AlF<sub>3</sub> production waste on the properties of hardened cement paste. *Materials Science*, 18.2: 187-191., [interaktyvus]., 2012 [žiūrėta 2022-09-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.02.006>
34. BILIM, Cahit. Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 25.8: 3175-3180., [interaktyvus]., 2011 [žiūrėta 2022-09-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.02.006>
35. YILMAZ, Bülent, et al. Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended Portland cement. *Building and environment*, 42.11: 3808-3815. [interaktyvus]., 2007 [žiūrėta 2022-09-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.006>
36. VAIČIUKYNIENĖ, Danutė, et al. Synergic effect between two pozzolans: Clinoptilolite and silica gel by-product in a ternary blend of a Portland cement system. *Construction and Building Materials*, 2022, 344: 128155, [interaktyvus]., 2022 [žiūrėta 2022-09-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128155>
37. MOTA, B.; MATSCHEI, T.; SCRIVENER, K. Impact of NaOH and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on the kinetics and microstructural development of white cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 108: 172-185. [interaktyvus]., 2018 [žiūrėta 2022-09-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.017>
38. FU, Jiayi, et al. Mechanisms of enhancement in early hydration by sodium sulfate in a slag-cement blend—Insights from pore solution chemistry. *Cement and Concrete Research*, 135: 106110. [interaktyvus]., 2020 [žiūrėta 2022-09-26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106110>
39. LI, Guo, et al. Resistance of concrete to Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> freeze-thaw cycles and failure mechanism analysis. In: *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2016. p. 335-342. [interaktyvus]., 2016 [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.711.335>
40. HOSSACK, Ashlee M.; THOMAS, Michael DA. The effect of temperature on the rate of sulfate attack of Portland cement blended mortars in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. *Cement and Concrete Research*, 73: 136-142. [interaktyvus]., 2015 [žiūrėta 2022-11-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/app.52880>