

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Lina LEKŪNAITĖ

KALCIO HIDROSILIKATŲ SUSIDARYMĄ  
INTENSYVINANČIŲ PRIEDŲ POVEIKIS  
AUTOKLAVINIO AKYTOJO BETONO  
FORMAVIMO MIŠINIŲ IR PRODUKTŲ  
SAVYBĖMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

### **Mokslinis vadovas**

prof. habil. dr. Antanas LAUKAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

### **Konsultantas**

dr. Modestas KLIGYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

VGTM leidyklos TECHNIKA 2149-M mokslo literatūros knyga  
*<http://leidykla.vgtu.lt>*

ISBN 978-609-457-494-8

© VGTM leidykla TECHNIKA, 2013

© Lina Lekūnaitė, 2013

*[lina.lekunaite@vgtu.lt](mailto:lina.lekunaite@vgtu.lt)*

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Lina LEKŪNAITĖ

**INFLUENCE OF ADDITIVES INTENSIFYING  
FORMATION OF THE CALCIUM  
HIDROSILICATES ON PROPERTIES OF  
THE FORMING MIXTURES AND  
PRODUCTS OF AUTOCLAVED AERATED  
CONCRETE**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
MATERIALS ENGINEERING (08T)



Vilnius LEIDYKLA  
TECHNIKA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

**Scientific Supervisor**

Prof Dr Habil Antanas LAUKAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T).

**Consultant**

Dr Modestas KLIGYS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T).

# Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas autoklavinis aktytasis betonas (AAB) su kalcio hidrosilikatų susidarymą intensyvinančiais silicio dioksido mikrodulkių (AS) ir malto anglies pluošto (AP) priedais.

AAB – universali statybinė medžiaga, pasižyminti geromis tiek stiprumo, tiek termoizoliacinėmis savybėmis. Šio betono gamybai naudojamos natūralios žaliavos: kalkės, kvarcinis smėlis, portlandcementis ir vanduo. Todėl AAB galima vadinti ekologišku.

Norint sukurti tokią lengvą ir pakankamo stiprio medžiagą, reikia kruopščiai parinkti geriausias formavimo mišinio sudėtis ir gamybos technologinius parametrus. To neįmanoma padaryti be atskirų komponentų ir visos medžiagos tyrimo. Gaminant AAB labai svarbus yra jo makro- bei mikrostruktūros susidarymas, tai lemia stiprumo savybes. Naudojant AS ir AP priedus siekiama pagerinti minėtas savybes.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomi tyrimų metodai, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai.

Pirmajame skyriuje pateikta AAB su priedais mokslinių tyrimų apžvalga. Skyriaus pabaigoje pateiktos literatūrinės apžvalgos išvados ir disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašytos tyrimams naudotos medžiagos, pateiktos pagrindinės jų charakteristikos. Taip pat aprašyti taikyti tyrimų metodai ir naudota įranga.

Trečiajame skyriuje pateikti kalcio hidrosilikatų susidarymą intensyvinančių AS bei AP priedų ir jų kiekio poveikis AAB formavimo mišinių savybėms. Nustatyta, kaip priedai veikia AAB formavimo mišinių sklidumą, didžiausiąją temperatūrą, išsipūtimo aukštį bei plastiškąjį stiprį. Taip pat šiame skyriuje tirta, kaip minėti priedai keičia AAB tankį, ultragarso impulso greitį, terminę susitrauktį, šilumos laidumą, laidumą vandens garams, atsparumą šalčiui, gniuždymo bei lenkimo stiprius, pateikta AAB su priedais makro- bei mikrostruktūrų analizė. Gauti stiprumo savybių rezultatai apdoroti statistiškai. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais parengta AAB su AS ir AP gamybos technologinė schema.

Disertacijos tema paskelbti 4 straipsniai: 3 – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazę bei vienas – recenzuojamoje konferencijos medžiagoje. Disertacijos tema atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šešiose mokslinėse konferencijose.

# Abstract

Autoclaved aerated concrete (AAC) with silica microparticles (AS) and of milled carbon fibres (AP) additives intensifying formation of the calcium hydrosilicates is analysed in this study. Autoclaved aerated concrete is a universal building material, characterized by sufficiently good both strength and thermal properties. Natural materials such as lime, quartz sand, Portland cement and water are used for the production of this concrete. Therefore, AAC can be called ecological.

Optimal compositions of forming mixtures and technological parameters of production should be carefully chosen in order to create such lightweight material having enough strength this can not be done without research of whole material and its components. Formation of macro- and microstructure is very important as it results strength properties, when AAC is produced. Seeking to improve mentioned properties AS and AP additives are used.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, result analysis, list of the literature and list of author publications on the dissertation topic.

Introductory chapter discusses the research problem, the relevance of research and describes the object of the formulated goal and objectives, describes the research method, scientific novelty, the results of practical significance and hypotheses.

Chapter 1 provides a review of literature of scientific research on autoclaved aerated concrete with additives. Conclusions are drawn and tasks for the dissertation are reconsidered at the end of the chapter.

Chapter 2 describes the materials used for testing, their essential characteristics, test methods and equipment.

Chapter 3 describes AS and AP additives and influence of their quantity on the properties of forming mixtures of AAC. It was established how these additives influence on spreadability, temperature, expansion and plasticity strength of forming mixtures of autoclaved aerated concrete. It was also established how mentioned additives change density, ultrasonic impulse velocity, shrinkage, thermal conductivity, water vapour permeability, compressive and flexural strengths of AAC specimens and analysis of the macro- and microstructures was given in this chapter. The results of strength properties were processed statistically. The production technology of autoclaved aerated concrete with AS and AP was prepared, according to the research results.

4 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: 3 – in the scientific journal, included in the *Thomson ISI* register, and one article – in reviewed conference material. Research results on the subject of the discussed dissertation have been presented in 6 scientific conferences.

---

## Terminai

AAB formavimo mišinio priedai – medžiagos, kurių maži kiekiai naudojami autoklavi-  
nių bandinių technologiniams procesams reguliuoti ir pusgaminių bei gaminių savybėms  
pagerinti (LST 1436).

Akytasis betonas – dirbtinis akmuo su vienodai pasiskirsčiusiomis sferinės formos po-  
romis (Laukaitis 2000).

Akytojo betono formavimo mišinio plastiškasis stipris – plastometrais nustatomas akyto-  
jo betono mišinio susirišimą įvertinantis stipris, kuriam esant luitas gali būti pjaustomas į  
pusgaminius (LST 1436).

Akytojo betono formavimo mišinio sklidumas – tokios konsistencijos mišinys, kuris  
plastiškai deformuodamasis dėl savo masės poveikio ant lygaus paviršiaus pasklinda tam  
tikro skersmens paplotėlio pavidalu (LST 1436).

Ekvivalentinis rišamosios medžiagos kiekis – atitinkamas kalkių arba portlandcemenčio  
kiekis mišrioje rišamojoje medžiagoje, apskaičiuojamas pagal formulę taip, kad, pakei-  
tus dalį vienos medžiagos kita, silikatinio mišinio aktyvumas liktų pastovus (LST 1436).

Formavimo mišinio kaupas – formos paviršiuje susidaręs sferinis išsipūtusios akytosios  
formavimo mišinio perteklius (Laukaitis 2000).

Formavimo mišinio temperatūra – didžiausioji formavimo mišinio rišamosios medžiagos  
hidratacijos temperatūra (LST 1436).

Makrostruktūra – be mikroskopo matoma struktūra (Daukšas *et al.* 2003).

Matrica – ištisinė sudedamoji dalis visame kompozito tūryje, užtikrinant jo vienalytiškumą, fiksuojanti bandinio formą ir intarpų tarpusavio išsidėstymą bei tolygų apkrovos pasiskirstymą visame kompozite (Marčiukaitis 2007).

Mikrostruktūra – kietųjų medžiagų struktūra, matoma tik labai padidinta (mikroskopu) (Daukšas *et al.* 2003).

Porų apvalumas – akytojo betono poringosios struktūros  $1\text{ cm}^2$  porų apvalumas, kur apvali pora (apskritimas) būtų lygi 100 %.

Porų perimetras – akytojo betono poringosios struktūros  $1\text{ cm}^2$  porų perimetras.

Porų plotas – akytojo betono poringosios struktūros  $1\text{ cm}^2$  porų plotas.

Terminė susitrauktis – AAB bandinio ilgio pokytis (sumažėjimas) kaitinant aukštose temperatūrose.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

$d$  – AAB bandinių storis, mm;

$R$  – determinacijos koeficientas;

$S_r$  – vidutinis kvadratinis nuokrypis;

$P_{pl}$  – akytojo betono plastiškasis stipris, N/mm<sup>2</sup>;

$T$  – temperatūra, °C;

$\lambda$  – šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K);

$\rho$  – medžiagos tankis, kg/m<sup>3</sup>;

$V_{UIG}$  – ultragarso impulso sklidimo greitis, m/s;

$\sigma_{pr}$  – AAB lenkimo stipris, N/mm<sup>2</sup> (MPa);

$V$  – AAB bandinių tūris, m<sup>3</sup>;

$m$  – AAB bandinių masė, kg.

## **Santrumpos**

AAB – autoklavinis akytasis betonas;

NAB – neautoklavinis akytasis betonas, kurio tankis 300–1000 kg/m<sup>3</sup>;

Al pasta – aliuminio pasta;

AP – anglies pluoštas;

AS – SiO<sub>2</sub> mikrodulkės, kuriose vyrauja amorfinis silicio dioksidas;

C-S-H – kalcio hidrosilikatai;

PAM – paviršių aktyvinanti medžiaga;

UIG – ultragarso impulso sklidimo greitis, m/s;

V/K – vandens ir kietų medžiagų santykis.

---

# Turinys

|                                                                                   |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| IVADAS .....                                                                      | 1     |
| Problemos formulavimas.....                                                       | 1     |
| Darbo aktualumas.....                                                             | 2     |
| Tyrimų objektas.....                                                              | 2     |
| Darbo tikslas.....                                                                | 2     |
| Darbo uždaviniai .....                                                            | 3     |
| Tyrimų metodai.....                                                               | 3     |
| Darbo mokslinis naujumas .....                                                    | 3     |
| Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....                                            | 4     |
| Ginamieji teiginiai.....                                                          | 5     |
| Darbo rezultatų aprobavimas.....                                                  | 5     |
| Disertacijos struktūra.....                                                       | 5     |
| <br>1. AUTOKLAVINIO AKYTOJO BETONO SU PRIEDAIS MOKSLINIŲ TYRIMŲ<br>APŽVALGA ..... | <br>7 |
| 1.1. Akytųjų betonų klasifikacija ir techninės charakteristikos .....             | 7     |
| 1.2. Priedų naudojimas tankiuosiuose ir akytuosiuose betonuose .....              | 11    |
| 1.3. Priedų poveikis tankiųjų ir akytųjų betono savybėms .....                    | 17    |
| 1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....         | 23    |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2. AUTOKLAVINIO AKYTOJO BETONO SU SILICIO DIOKSIDO<br>MIKRODULKIŲ IR MALTO ANGLIES PLUOŠTO PRIEDAIS MEDŽIAGOS<br>IR TYRIMŲ METODAI.....                 | 25 |
| 2.1. Tyrimams naudotos medžiagos .....                                                                                                                  | 25 |
| 2.2. Formavimo mišinių paruošimas ir bandinių formavimas .....                                                                                          | 30 |
| 2.3. Tyrimų metodai .....                                                                                                                               | 31 |
| 2.3.1. Autoklavinio akytojo betono formavimo mišinių tyrimų metodai .....                                                                               | 31 |
| 2.3.2. Sukietinto autoklavinio akytojo betono tyrimų metodai .....                                                                                      | 33 |
| 2.4. Antrojo skyriaus išvados .....                                                                                                                     | 40 |
| 3. SILICIO DIOKSIDO MIKRODULKIŲ IR MALTO ANGLIES PLUOŠTO<br>PRIEDŲ POVEIKIS AUTOKLAVINIO AKYTOJO BETONO FORMAVIMO<br>MIŠINIŲ IR BANDINIŲ SAVYBĖMS ..... | 41 |
| 3.1. Autoklavinio akytojo betono su priedais formavimo mišinių savybės .....                                                                            | 41 |
| 3.1.1. Priedų ir aliuminio pastos pasiskirstymas autoklavinio akytojo betono<br>formavimo mišinyje .....                                                | 42 |
| 3.1.2. Sklidumas .....                                                                                                                                  | 43 |
| 3.1.3. Didžiausioji temperatūra .....                                                                                                                   | 44 |
| 3.1.4. Išsipūtimo aukštis .....                                                                                                                         | 45 |
| 3.1.5. Plastiškasis stipris .....                                                                                                                       | 46 |
| 3.1.6. Ultragarso impulso sklaidimo greitis .....                                                                                                       | 48 |
| 3.2. Sukietinto autoklavinio akytojo betono su priedais savybės .....                                                                                   | 49 |
| 3.2.1. Makrostruktūra .....                                                                                                                             | 49 |
| 3.2.2. Mikrostruktūra .....                                                                                                                             | 53 |
| 3.2.3. Tankis .....                                                                                                                                     | 58 |
| 3.2.4. Ultragarso impulso sklaidimo greitis .....                                                                                                       | 59 |
| 3.2.5. Gniuždyimo stipris .....                                                                                                                         | 60 |
| 3.2.6. Lenkimo stipris .....                                                                                                                            | 63 |
| 3.2.7. Terminė susitrauktis .....                                                                                                                       | 65 |
| 3.2.8. Laidumas vandens garams .....                                                                                                                    | 66 |
| 3.2.9. Šilumos laidumo koeficientas .....                                                                                                               | 67 |
| 3.2.10. Atsparumas šalčiui .....                                                                                                                        | 68 |
| 3.3. Autoklavinio akytojo betono su silicio dioksido mikrodulkių arba malto<br>anglies pluošto priedu gamybos technologinė schema .....                 | 69 |
| 3.4. Trečiojo skyriaus išvados .....                                                                                                                    | 71 |
| BENDROSIOS IŠVADOS .....                                                                                                                                | 73 |
| LITERATŪRA IR ŠALTINIAI .....                                                                                                                           | 75 |
| AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .....                                                                                                   | 83 |
| PRIEDAS. Autoklavinio akytojo betono modifikuoto silicio dioksido mikrodulkių<br>priedu bandyminės partijos pagaminimo aktas .....                      | 85 |

---

# Contents

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION .....                                                                                                                            | 1  |
| Problem under investigation.....                                                                                                              | 1  |
| Topicaly of work .....                                                                                                                        | 2  |
| Object of research.....                                                                                                                       | 2  |
| Aim of work .....                                                                                                                             | 2  |
| Task of work.....                                                                                                                             | 3  |
| Methods of research .....                                                                                                                     | 3  |
| Scientific novelty.....                                                                                                                       | 3  |
| Prectical value of work results .....                                                                                                         | 4  |
| Defended propositions.....                                                                                                                    | 5  |
| Approval of work results.....                                                                                                                 | 5  |
| Structure of dissertation.....                                                                                                                | 5  |
| 1. OVERVIEW RESEARCHES OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE<br>WITH ADDITIVES .....                                                                 | 7  |
| 1.1 Classification and specifications of aerated concretes.....                                                                               | 7  |
| 1.2. Use of additives in dense and aerated concretes.....                                                                                     | 11 |
| 1.3. Influence of additives on dense and aerated concretes properties .....                                                                   | 17 |
| 1.4. Conclusions of the first chapter and formulation of tasks of dissertation.....                                                           | 23 |
| 2. RAW MATERIALS AND RESEARCH METHODS OF AUTOCLAVED<br>AERATED CONCRETE WITH SILICA MICROPARTICLES AND MILLED<br>CARBON FIBER ADDITIVES ..... | 25 |

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Raw materials used for investigations .....                                                                                                                               | 25 |
| 2.2. Preparation of forming mixtures and formation of specimens .....                                                                                                          | 30 |
| 2.3. Methods of investigations .....                                                                                                                                           | 31 |
| 2.3.1. Methods of investigations of autoclaved aerated concrete forming<br>mixtures.....                                                                                       | 31 |
| 2.3.2. Methods of investigations of hardened autoclaved aerated concrete<br>specimens .....                                                                                    | 33 |
| 2.4. Conclusions of the second chapter .....                                                                                                                                   | 40 |
| <br>3. RESEARCH OF INFLUENCE OF SILICA MICROPARTICLES AND MILLED<br>CARBON FIBER ADDITIVES ON AUTOCLAVED AERATED CONCRETE<br>FORMATION MIXTURES AND SPECIMENS PROPERTIES ..... | 41 |
| 3.1. Properties of autoclaved aerated concrete formation mixtures.....                                                                                                         | 41 |
| 3.1.1. Distribution of autoclaved aerated concrete additives and aluminum paste                                                                                                | 42 |
| 3.1.2. Spreadability.....                                                                                                                                                      | 43 |
| 3.1.3. Maximum temperature .....                                                                                                                                               | 44 |
| 3.1.4. Expansion .....                                                                                                                                                         | 45 |
| 3.1.5. Plasticity strength .....                                                                                                                                               | 46 |
| 3.1.6. Ultrasonic impulse velocity .....                                                                                                                                       | 48 |
| 3.2. Properties of hardened autoclaved aerated concrete with additives .....                                                                                                   | 49 |
| 3.2.1. Macrostructure.....                                                                                                                                                     | 49 |
| 3.2.2. Microstructure .....                                                                                                                                                    | 53 |
| 3.2.3. Density .....                                                                                                                                                           | 58 |
| 3.2.4. Ultrasonic impulse velocity .....                                                                                                                                       | 59 |
| 3.2.5. Compressive strength .....                                                                                                                                              | 60 |
| 3.2.6. Flexural strength.....                                                                                                                                                  | 63 |
| 3.2.7. Thermal shrinkage .....                                                                                                                                                 | 65 |
| 3.2.8. Water vapour permeability .....                                                                                                                                         | 66 |
| 3.2.9. Thermal conductivity.....                                                                                                                                               | 67 |
| 3.2.10. Freeze-thaw .....                                                                                                                                                      | 68 |
| 3.3. Technological diagram of manufacturing of autoclaved aerated concrete with<br>silica microparticles and milled carbon fiber additives.....                                | 69 |
| 3.4. Conclusions of the third chapter .....                                                                                                                                    | 71 |
| <br>GENERAL CONCLUSIONS .....                                                                                                                                                  | 73 |
| <br>REFERENCES .....                                                                                                                                                           | 75 |
| <br>LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF<br>DISSERTATION .....                                                                                         | 83 |
| <br>ANNEX. Prototyping batch production act of autoclaved aerated concrete modified<br>silica microparticles additive.....                                                     | 85 |

---

# Ivadas

## Problemos formulavimas

Pagal Statybos produktų reglamento 305/2011, kuris pakeičia statybos produktų direktyvą 89/106/EEC, vienas iš septynių esminių statinių reikalavimų yra energijos taupymas ir išsaugojimas. Pagal šį reikalavimą statiniams šildyti turi būti suvartojama kuo mažiau energijos.

Nuolat griežtėjant pastatų atitvarų šiluminės varžos reikalavimams, akytasis betonas vis plačiau naudojamas mažaaukštėje statyboje, todėl vis dažniau juo keičiamos tradicinės keramikos arba silikatinės plytos.

Pagrindinė autoklavinio akytojo betono (AAB) gaminių naudojimo sritis yra pastatų atitvaros. AAB turi daug teigiamų savybių. Šio betono gamybai naudojamos plačiai paplitusios natūralios žaliavos: kalkės, kvarcinis smėlis, portlandcementis ir vanduo. Todėl šią medžiagą galima vadinti ekologiška. Yra gana nesudėtinga dirbti su AAB gaminiais, nes jis yra lengvas ir paprastai apdorojamas (pjaustomas, frezuojamas, gręžiamas), yra nedegus ir atsparus puvinio procesams.

AAB pasižymi pakankamai geromis konstrukcinėmis, termoizoliacinėmis ir akustinėmis savybėmis. Priklausomai nuo tankio ( $400\text{--}600\text{ kg/m}^3$ ) šilumos laidumo koeficientas gali kisti nuo  $0,080\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  iki  $0,16\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Šiuo metu AAB naudojamas mažaaukščių gyvenamųjų namų statyboje kaip konstrukcinė ir

termoizoliacinė medžiaga. AAB blokais galima užpildyti daugiaaukščių karkasinių pastatų angas. Pagrindinė aktytųjų betonų stiprumo savybė – gniuždymo stipris, tačiau jis yra nedidelis. Gniuždymo ir lenkimo stiprius galima padidinti naudojant kalcio hidrosilikatų susidarymą intensyvinančius pucolaninius arba pluoštinius priedus. Šiame darbe kaip pucolaninis priedas buvo naudotos  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės, o kaip pluoštinis – maltas anglies pluoštas. Panaudojus AAB gamybai anglies pluošto ir  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių priedus, galima išplėsti jo naudojimo sritį, t. y. AAB panaudoti kaip kaitrai atsparią medžiagą (iki 700 °C).

## Darbo aktualumas

Sandėliavimo ir vežimo metu hermetiškai supakuoti autoklavinio aktytojo betono gaminiai dėl susikaupusios drėgmės praranda iki 30 % stiprio (Sinica *et al.* 2005; Sezeman *et al.* 2010), tad aktualu naudoti priedus, kurie pagerintų autoklavinio aktytojo betono gaminių stiprumo savybes. Sustiprinus aktytąjį betoną būtų galima jį palengvinti ir pagaminti stiprią termoizoliacinę medžiagą. Vieni iš tokių priedų yra  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės ir maltas anglies pluoštas. Norint gauti minėtas savybes, reikia nustatyti geriausius  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedų kiekius bei išspręsti šių priedų ir Al pastos tolygų pasiskirstymą.

Autoklavinis aktytasis betonas su  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių priedu kompleksiskai ištirtas nebuvo. Todėl šiame darbe nagrinėjamas jo poveikis autoklavinio aktytojo betono formavimo mišinių savybėms: konsistencijai, išsipūtimui, didžiausiajai temperatūrai (rišamųjų medžiagų hidratacijai), plastiškajam stipriui ir betono savybėms: mikro- ir makrostruktūrai, šilumos laidumui, laidumui vandens garams ir atsparumui šalčiui. Analogiškai buvo tirtas rutuliniu malūnu malto anglies pluošto priedo poveikis.

## Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – autoklavinis aktytasis betonas su kalcio hidrosilikatų susidarymą intensyvinančiais silicio dioksido mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedais.

## Darbo tikslas

Kompleksiškai ištirti silicio dioksido mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedų poveikį autoklavinio aktytojo betono formavimo mišinių ir bandinių savybėms.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti geriausius  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedų kiekius.
2. Ištirti  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedų poveikį autoklavinio akytojo betono formavimo mišinių konsistencijai, didžiausiajai temperatūrai, išsipūtimo aukščiui, plastiškajam stipriui.
3. Nustatyti minėtų priedų poveikį autoklavinio akytojo betono savybėms (tankiui, makro- ir mikrostruktūrai, fazinei kalcio hidrosilikatų sudėčiai, gniuždymo ir lenkimo stipriams, terminei susitraukčiai, šilumos laidumui, laidumui vandens garams, atsparumui šalčiui).
4. Parengti modifikuoto autoklavinio akytojo betono su priedais technologinę gamybos schemą.

## Tyrimų metodai

Šiame darbe autoklavinio akytojo betono formavimo mišinių savybės buvo nustatytos remiantis (Martinenko, Morozov 2009) apibendrintais metodais. Autoklavinio akytojo betono stiprumo savybės buvo nustatytos pagal LST EN 679 ir LST EN 1351 standartų reikalavimus. Tankis nustatytas remiantis LST EN 678 standartu. Makrostruktūra nustatyta optiniu mikroskopu „Motic“, struktūros nuotraukų analizei panaudotos „UTHSCSA Image tool“ ir „Pixcavator Image Analysis“ programos. Medžiagų mikrostruktūrai tirti ir analizuoti naudotas skenuojantis elektroninis mikroskopas „JSM 6490 LV“ ir porozimetras „PoroMaster 33“. Rentgenografiniai tyrimai atlikti rentgeno difraktrometru „DRON-7“, termografiniai tyrimai – derivatografu „Linseis STA PT-1600“, o terminė susitrauktis – dilatometru „LINSEIS L76“. Stiprumo savybių tyrimų rezultatams apdoroti taikyti matematiniai statistiniai metodai. Autoklavinio akytojo betono šilumos laidumo koeficientui, laidumui vandens garams ir atsparumui šalčiui nustatyti taikyti metodai, pateikti Lietuvos standartuose LST EN 1745, LST EN 772-15 ir LST EN 15304.

## Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Darbe kompleksiškai ištirtas autoklavinis akytasis betonas su kalcio hidrosilikatų susidarymą intensyvinančiais  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedais. Parinkti geriausi minėtų priedų kiekiai ir formavimo mišinių sudėtys. Tolygus priedų pasiskirstymas formavimo mišinyje pasiektas išsklaidant priedų (su dalimi vandens ir paviršių aktyvinančia medžiaga) ir aliuminio pastos daleles bei parenkant atitinkamą maišymo režimą.
2. Nustatytas priedų poveikis autoklavinio akytojo betono formavimo mišinių savybėms: sklidumui, didžiausiajai temperatūrai, išsipūtimo aukščiui, plastiškajam stipriui.
3. Nustatyta, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedai sustiprina autoklavinio akytojo betono porų sienes.  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių priedas, jau būdamas pradinėje stadijoje, skatina C-S-H susidarymą, terminio apdorojimo metu sudarydamas gerą sąlyčio zoną su nesureagavusia smėlio dalele. Malto anglies pluošto dalelių paviršius veikia kaip kalcio hidrosilikatų kristalizacijos centrai. Todėl modifikuotas autoklavinis akytasis betonas turi geresnes stiprumo savybes ir mažesnę terminę susitrauktį.
4. Naudojant priedus autoklavinio akytojo betono struktūroje susidaro daugiau uždarų porų, todėl sumažėja sukietėjusio betono šilumos laidumas ir laidumas vandens garams.
5. Statistiškai apdorojus bandymų rezultatus išvestos regresinės lygtys, kuriomis remiantis galima prognozuoti  $400\text{--}450 \text{ kg/m}^3$  tankio intervale AAB gniuždymo ir lenkimo stiprių vertes.
6. Panaudojus minėtus priedus gautas  $\sim 450 \text{ kg/m}^3$  tankio autoklavinis akytasis betonas, kurio gniuždymo stipris  $\sim 4 \text{ MPa}$ , lenkimo stipris  $\sim 2 \text{ MPa}$ , šilumos laidumo koeficientas  $\sim 0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , terminė susitrauktis  $\sim 1 \%$ .

## Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Autoklavinis akytasis betonas pagamintas su  $1,0 \%$   $\text{SiO}_2$  mikrodulkių arba  $0,1 \%$  malto anglies pluošto priedu savo fizikinėmis ir mechaninėmis bei šiluminėmis ir techninėmis savybėmis yra pranašesnis už autoklavinio akytojo betono be priedų. Didesnis formavimo masės plastiškasis stipris leidžia sutrumpinti technologinių operacijų trukmę. Autoklavinis akytasis betonas, pagamintas su  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedu, pasižymi mažesne terminė susitrauktimi. Tai užtikrina jo naudojimą temperatūroje iki  $700^\circ\text{C}$  kaip kaitrai atsparų betoną.

## Ginamieji teiginiai

1. Silicio dioksido mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedai turi poveikį autoklavinio akytojo betono formavimo mišinių sklidumui, didžiausiai temperatūrai, išsipūtimo aukščiui, plastiškajam stipriui, makro- ir mikrostruktūroms.
2. Silicio dioksido mikrodulkių priedas intensyvina hidrosilikatinį kietėjimą, o malto anglies pluošto priedas autoklavinio kietinimo metu veikia kaip kristalizacijos centrai, skatina kalcio hidrosilikatų susidarymą. Tokio modifikuoto autoklavinio akytojo betono stiprumo savybės geresnės.

## Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdinti keturi moksliniai straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI Web of Science* leidinių sąrašą (Laukaitis *et al.* 2011, 2012; Lekūnaitė *et al.* 2012); vienas – kitame konferencijų straipsnių rinkinyje (Balčiūnas *et al.* 2011).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šešiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Respublikinėje konferencijoje „*Medžiagų inžinerija 2009*“, įvykusioje 2009 m. lapkričio 20 d.;
- 13-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“, įvykusioje 2010 m. kovo 26 d.;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Medžiagų inžinerija 2010*“, įvykusioje 2010 m. lapkričio 19 d.;
- 14-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“, įvykusioje 2011 m. kovo 22 d.;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Medžiagų inžinerija 2011*“, įvykusioje 2011 m. spalio 27 d.;
- 15-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“, įvykusioje 2012 m. kovo 22 d.

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Darbo apimtis 83 puslapiai (be priedo), tekste panaudota 13 numeruotų formulių, 46 paveikslai ir 5 lentelės. Rašant disertaciją buvo naudotasi 129 literatūros šaltiniais.

---

# **Autoklavinio akytojo betono su priedais mokslinių tyrimų apžvalga**

Skyriuje aptariama autoklavinio akytojo betono (AAB) klasifikacija, techninės charakteristikos ir panaudojimo sritys. Analizuojama, kaip įvairūs pluoštiniai priedai ir mikropriedai veikia tankiųjų ir poringųjų betonų stiprumo savybes bei struktūrą. Remiantis literatūros šaltiniuose aprašytais AAB su priedais savybių tyrimais, galima teigti, kad naudojami priedai veikia AAB stiprumo savybes, mikrostruktūrą, C-S-H susidarymą, makrostruktūrą bei terminę susitrauktį. Apžvelgta literatūra, kurioje analizuojami smulkių priedų išskaidymo ir gero pasiskirstymo betono formavimo mišinyje būdai.

## **1.1. Akytųjų betonų klasifikacija ir techninės charakteristikos**

Siekiant padidinti efektyvumą statybos sektoriuje, reikia dėmesį sutelkti į naujų statybinių medžiagų ir konstrukcijų, kurios atitiktų šiuolaikinius eksploatacinius reikalavimus, kūrimą ir gamybą. Jos turėtų būti pagamintos mažiausiomis žaliavų ir energijos sąnaudomis, naudojant vietines žaliavas (Sinica 2001; Kli-

gys 2009). AAB yra ekologiška ir, dėl savo mažo tankio bei pakankamo stiprio, inovatyvi statybinė medžiaga (Just, Middendorf 2009).

AAB klasifikuojamas pagal porų formavimo būdus: dujų, putų ir mišrųjų; pagal naudojamą rišamąją medžiagą: cementinis, kalkių, su pucolaninėmis medžiagomis arba atliekomis (kurios pakeičia dalį smėlio) bei naudojant mišrią rišamąją medžiagą; pagal kietinimo būdą: autoklavinis, neautoklavinis ir šutinas (Narayanan, Ramamurthy 2000b).

**Akytieji betonai gauti naudojant putokšlius.** Šio metodo esmė ta, kad akytojo betono mišinio komponentai sumaišomi su specialiai pagamintomis putomis. Mišiniui sukietėjus gaunama akytoji medžiagos struktūra. Putomis vadinama dispersine dviejų fazių sistema, sudaryta iš skystosios fazės, dažniausiai vandens, ir dujinės fazės, kurią sudaro oro burbuliukai, vienas nuo kito atskirti plonomis skysčio plėvelėmis. Remiantis Rebinderio teorija putos apibūdinamos kaip struktūrizuota sistema, pasižyminti tam tikru formos standumu (tamprumu). Putų gamybai naudojami putokšliai. Pagrindinės putokšlių savybės putų kartotinumai ir stabilumas (Laukaitis 2000).

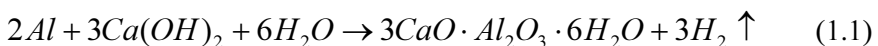
**Akytieji betonai gauti naudojant dujodarij.** Dujodariai turi pasižymėti tokiomis savybėmis:

- a) išskiriamų dujų tūris turi būti artimas teoriniam;
- b) dujos turi išsiskirti tolygiai;
- c) būti chemiškai stabilūs;
- d) neturi savaime skilti;
- e) neišskirti žmonių sveikatai kenksmingų dujų;
- f) turi būti pigūs ir plačiai paplitę.

Tokių savybių turi daugelis medžiagų, kurios skildamos išskiria azotą, vandenilį, deguonį ir anglies dioksidą (Laukaitis 2000).

Šiuo metu plačiausiai naudojamas dujodaris yra aliuminio pasta. Naudojant dujodarius vyksta cheminė reakcija tarp Al pastos ir kalkių. Šios reakcijos metu susidaro dujos, kurios bandydamos pasišalinti iš plastiško betono formavimo mišinio, sudaro joje poras.

Užmaišytame su vandeniu formavimo mišinyje vyksta rišamosios medžiagos hidratacija ir hidrolizė ir jos metu susidariusio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  reakcija su aliuminio pasta, kurios metu išsiskiria  $\text{H}_2$  dujos:

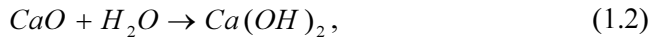


Dujų betono poringumą galima lengviau kontroliuoti nei putų, nes jis priklauso tik nuo naudojamo Al pastos kiekio, o gaminant putų betoną, putų susidarymas priklauso ne tik nuo putokšlio kiekio, bet ir nuo maišyklės tipo, maišymo

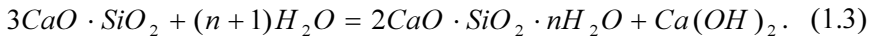
laiko ir greičio. Gaminant dujų betoną gaunamos vienodesnės poros ir formavimo metu sunaudojama mažiau vandens, nes putų betono atveju esant mažam vandens kiekiui, gali nesusidaryti reikiamo putų kiekio (Just, Middendorf 2009).

Akytasis betonas su mišria kalkių/portlandcemenčio rišamąja medžiaga yra gaunamas sumaišius smėlį, kalkes, portlandcementį, vandenį ir porodarį. Formavimo mišinys vyksta šie procesai:

iš pradžių gesinasi kalkės:



vėliau hidratuojasi portlandcementis, t. y. pagrindinis mineralas – trikalcio silikatas – hidrolizės metu skyla į dikalcio silikato hidratą ir kalcio hidroksidą:



Šiuo atveju  $Ca(OH)_2$  vėliau reaguoja su Al pasta ir išsiskiria vandenilio dujos, kurios suformuoja poringą akytojo betono struktūrą.

Kai naudojama mišri rišamoji medžiaga, išpūstas formavimo mišinys įgauna didesnę plastišką stiprį. Tai neleidžia suirti poringajai struktūrai (Mikulskis 2007).

Darbe (Narayanan, Ramamurthy 2000b) teigiama, kad AAB santykinai yra homogeniška medžiaga, lyginant su įprastais betonais, nes turi didelių tarpų – porų. Jo savybės priklauso nuo mikrostruktūros, sudedamųjų medžiagų, rišiklio tipo, nuo porų formavimo būdo ir kietinimo. Viena iš pagrindinių AAB savybių yra geras šilumos laidumas. (Narayanan, Ramamurthy 2000a) autoriai susidomėjo AAB struktūrinėmis charakteristikomis dėl jo lengvumo, žaliavų tausojo ir potencialiai didelės atliekų naudojimo galimybės.

AAB savybės ir makrostruktūra priklauso nuo porų formavimo būdo. Jo struktūra nusakoma pagal AAB bandinio mikro- ir makroporas. Makroporos susiformuoja formavimo mišinio išsipūtimo metu, o mikroporos susidaro sienutėse esančiose tarp makroporų. Poros skirstomos pagal skersmenį: 50–500  $\mu m$  vadinamos didelėmis poromis, o nuo 50 nm iki 50  $\mu m$  vadinamos mikroporomis (Petrov, Schlegel 1994). Labai svarbu charakterizuoti porų struktūrą, nuo kurios priklausys gaminio savybės. AAB poringumas gali būti didesnis nei 80 %. Norint gauti geriausią struktūrą ir geras AAB savybes, reikalingos stabilios ir sferinės poros (Narayanan, Ramamurthy 2000b). AAB savybės taip pat priklauso ir nuo porų pasiskirstymo matricoje. Autoriai (Narayanan, Ramamurthy 2000b) teigia, kad specialia programa galima pamatyti AAB matricoje esančias dideles poras ir charakterizuoti porų dydžio išsibirstymą. Optiniu mikroskopu galima pagaminti struktūros nuotraukas, kurios paskui nagrinėjamos „Automatic image analysis“ programa.

AAB mikroporų kiekis, dydis, užimamas tūris bei plotas ir kt. dažniausiai nustatomi gyvsidabrinio porozimetru. Gyvsidabris įsiskverbia į struktūrą ir užpildo visus kapiliarus, taip gaunamas integralinis ir diferencialinis porų dydžio pasklidimas.

Nuo vandens ir kietųjų medžiagų santykio priklauso poringumas ir tankis (Narayanan, Ramamurthy 2000b). Daug AAB fizikinių savybių priklauso nuo tankio. AAB turi dideles tankio ribas. Specialiam pritaikymui galima pagaminti įvairaus tankio AAB.

AAB bandinių dydis ir forma, porų formavimo metodas, susidariusių C-S-H kiekis, apkrovos veikimo kryptis, senėjimas, vandens kiekis, žaliavų charakteristikos ir kietinimo metodas veikia AAB stiprį (Hanecka *et al.* 1997; Isu *et al.* 1995; Agar-Ozbek *et al.* 2013). Mikrostruktūroje susidariusiu C-S-H fazė ir kiekis, porų ir porų sienelių struktūra gerokai veikia gniuždymo stiprį. Tankio sumažėjimas dėl didesnių porų susiformavimo gerokai mažina stiprį. AAB gniuždymo stipris auga kartu su tankiu. AAB autoklavinis kietinimas gerokai didina gniuždymo stiprį, nes aukšta temperatūra sudaro sąlygas susidaryti stabilios formos kalcio hidrosilikatams. Nuo slėgio, kuriuo užtikrinama reikiama temperatūra, ir kietinimo laiko priklauso įgaunamas pageidautinas AAB stipris. Santykis tarp autoklavinio kietinimo slėgio, laiko ir gniuždymo stiprio buvo tirtas su skirtingo tipo AAB. Neautoklavinis akytasis betonas (NAB) 30–80 % savo stiprį įgauna nuo 28 parų iki 6 mėnesių kietinimo, ir nedidelę dalį po šio periodo. Dalis šio augimo priskiriama karbonizacijos procesui (Hanecka *et al.* 1997). (Just, Middendorf 2009) šaltinis teigia, kad natūraliomis sąlygomis kietintas akytasis betonas turi blogesnes stiprumo savybes, be to, joms pasiekti ilgėja kietinimo trukmė, todėl mažėja įmonių gamybinis pajėgumas. Gaminant AAB, kur poroms suformuoti naudojamas dujodaris, o rišamoji medžiaga yra kalkės, normaliomis sąlygomis  $\text{Ca(OH)}_2$  ir kvarcas chemiškai nereaguoja, todėl AAB turi būti kietinamas autoklave. AAB, pagamintame iš rišamosios medžiagos ir malto smėlio, autoklavinio kietinimo metu paprastai susidaro tobermoritas, neliaka laisvo kalcio hidroksido, sumažėja kvarco kiekis. Tai reiškia, kad įvyko kalcio hidroksido ir kvarco reakcija. Šio proceso metu susidaro stipri kalcio ir magnio hidrosilikatų cementuojanti medžiaga (Girnienė, Laukaitis 2002), dėl kurios AAB gaminiai įgauna stiprį (Laukaitis 2000).

AAB tamprumo modulis yra kaip gniuždymo stiprio funkcija. AAB lenkimo stipris apytiksliai gali būti apskaičiuojamas pagal formulę  $\text{MOR}=0,27+0,21 f_{ct}$ , čia  $f_{ct}$  – gniuždymo stipris, MPa (Narayanan, Ramamurthy 2000b).

Kitos labai svarbios AAB savybės – jo šilumos laidumas, laidumas vandens garams ir atsparumas šalčiui. Šios savybės priklauso nuo AAB tankio, drėgmės kiekio ir sudedamųjų medžiagų (Laurent, Gueree-Chaley 1995). Šilumos laidumui ir laidumui vandens garams neturi poveikio AAB kietinimo būdas, minėtas savybes veikia uždarų porų kiekis ir jų pasiskirstymas gaminyje.

## 1.2. Priedų naudojimas tankiuosiuose ir aktyuosiuose betonuose

Gaminant įvairių tipų betonus buvo naudojami pucolaniniai priedai –  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės,  $\text{F}_2\text{O}_3$  (Sánchez de Rojas *et al.* 1999),  $\text{ZnO}_2$  (Said *et al.* 2012; Ji 2005) nano- $\text{SiO}_2$ , lakieji pelenai (Cicek, Tanriverdi 2007), šlakai (Kar *et al.* 2012) ir kt., bei įvairūs pluoštiniai priedai, pvz., anglies pluoštas, stiklo pluoštas, stiklo ir akmens vatos pluoštas, įvairūs metaliniai tarpai ir pan.

**Mikropriedai.** Įvairių organinių ir neorganinių priedų naudojimas betono gamyboje – viena iš efektyviausių ir daug žadančių krypčių modernioje konstrukcijoje. Į cementinę masę pridėjus vieną dešimtąją dalį mikropriedo, galima iš esmės pakeisti cheminę betono sudėtį, kietinimo režimą, pagerinti stiprumo savybes ir daugelį fizikinių techninių savybių, pavyzdžiui, sumažinti šilumos laidumą ir pan. (Brykov *et al.* 2010). Būtent tokie priedai, gerinantys minėtas betonų savybes, padidins betonų su priedais produkciją visame pasaulyje. JAV ir Japonijoje pastaruosius du dešimtmečius 80–85 % sudaro betonai su mikropriedais, o Vokietijoje ir Australijoje 60–75 % visų rūšių betono produkcijos (Mollah *et al.* 2000; Houst *et al.* 2008). Priedai užtikrina ne tik galutinio AAB gaminių mechaninių savybių padidėjimą, bet ir tolygų makro- ir mikrostruktūros susidarymą.

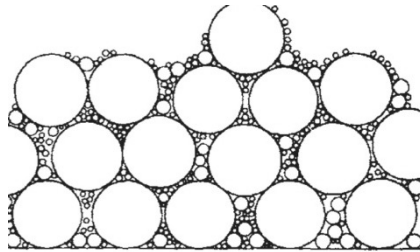
Dauguma darbų (Vauchskii 2004; Yakovlev 2006; Artamonova *et al.* 2006; Pukhareno *et al.* 2006; Korolev *et al.* 2006; Lotov 2006; Komokhov, Aleksandrov 2008; Chernyshov, Korotkikh 2008) įrodo, kad betono savybes veikia struktūros formavimo procesai, naudojami priedai, jų apdorojimas (mechaninis dalelių išsklaidymas, cheminis aktyvumas). Stiprumo savybes lemia ir pucolaniniai priedai, kurie veikia hidratacijos ir kietinimo procesus. Šių priedų yra daug, jie gali būti iš natūralių uolienu (trepelis, opoka, diatomitas) ir iš pramoninių atliekų (šlakai, pelenai, kiti  $\text{SiO}_2$  turintys priedai). Priedai iš pramoninių atliekų turi daug pranašumų, kurie ne tik pagerina betonų savybes, bet ir užtikrina atliekų utilizavimą. Vienas tokiu priedų –  $\text{ZnO}_2$ . (Riahi, Nazari 2011) šaltinyje teigiama, kad  $\text{ZnO}_2$  priedas didina betono gniuždymo stiprį viso kietėjimo metu.

Kitas aktyvus priedas – lakieji pelenai. Jie gaunami malant degimo pelenus iš krosnies dugno. (Cicek, Tanriverdi 2007) autoriai 68 % kietųjų medžiagų kiekio pakeitė lakiaisiais pelenais ir gamino kalkines plytas, kurių tankis –  $1140 \text{ kg/m}^3$ . Šias plytas autoriai kietino autoklave 6 h esant 1,5 MPa slėgiui ir nustatė, kad minėtas lakiųjų pelenų kiekis iki 10,25 MPa padidino gaminių gniuždymo stiprį bei iki  $0,34 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  sumažino šilumos laidumą.

(Brykov *et al.* 2010) teigiama, kad naudojant ultradispersius aktyvius priedus su dideliu silicio oksido kiekiu, galima gauti didelį (50–80 MPa) ir net labai

didelį ( $> 80$  MPa) betono stiprį, bet esant tokiam stipriui betonai yra labai tankūs ir jų šilumos laidumas yra gana didelis.

$\text{SiO}_2$  mikrodulkės naudojamos cementiniame mišinyje veikia galutinio gaminio savybes. (Xu, Chung 2000a) šaltinyje teigiama, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių dalelės skersmuo net 100 kartų mažesnis nei cemento, todėl naudojant šį priedą betone, smulkios  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių dalelės užpildo tarpus tarp didesnių cemento dalelių taip sudarydamos tankesnę matricą (1.1 pav.).



**1.1 pav.** Stipraus ir tankaus formavimo mišinio schema iš cemento ir mažų  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių dalelių (Pivinskii 2008)

**Fig. 1.1.** Scheme of a strong and dense forming mixture from large and small  $\text{SiO}_2$  microparticles (Pivinskii 2008)

$\text{SiO}_2$  turinčios medžiagos plačiai naudojamos ryšiui tarp matricos ir užpildų pagerinti. Tam tikrą kiekį cemento pakeitus mikrodulkėmis, jos gerina betonų stiprius, plastiškumą, poringumą (Xu, Chung 1999b; Fu, Chung 1998a), susitrauktį (Song, Zhang 1999; Xu, Chung 2000b), sukibimą su armatūra (Yahia *et al.* 1998; Hamad, Sabbah 1998; Li *et al.* 1998; Fu, Chung 1998a, 1998b), vandens ir laidumą vandens garams (Chan, Ji 1999; Thomas *et al.* 1999), atsparumą cheminiams poveikiams (Ali 1999; Morsy 1999), gaminyje esančios armatūros atsparumą korozijai (Zemajtis *et al.* 1999), atsparumą šalčiui, matmenų nuokrypius (Fu, Chung 1998b), terminio išsiplėtimo koeficientą (Fu, Chung 1998a), savitąją šilumą, šilumos laidumą (Fu, Chung 1998a; Xu, Chung 1999a) bei pluoštinių priedų pasiskirstymą (Park *et al.* 1999, Pigeon 1998). (Mukhopadhyay 2011) taip pat teigė, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės yra labai reaktyvus pucolaninis priedas, kuris intensyvina kalcio hidrosilikatų susidarymą bei veikia kaip mikroužpildas, kuris užpildo tarpus tarp stambesnių dalelių. Yra hipotezė, kad dėl tokių  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių savybių, padidėjo ryšys tarp atskirų komponentų, dėl to padidėjo ir gniuždymo stipris (Li *et al.* 2004a, 2004b).

Kaip mikroužpildas  $\text{SiO}_2$  milteliai ypač tinka šiuolaikinės statybos pramonėje (Davraz, Gunduz 2005). Minėtas priedas buvo naudojamas statyboje nuo 1994 m. Naujojoje Zelandijoje, jo naudojimo būdas metams einant tobulėjo (Kuhanandan Nambiar, Ramamurthy 2007a; Zain *et al.* 2000).

SiO<sub>2</sub> mikrodulkės yra labai smulki medžiaga, todėl didina cemento skiedinio klampą, taip atsiranda didesni takumo įtempiai, norint to išvengti reikia didinti vandens ir rišamųjų medžiagų santykį (Wang *et al.* 2010), o kituose (Dunster 2009; Vijayarethinam 2009) šaltiniuose teigiama, kad naudojant SiO<sub>2</sub> mikrodulkes galima sumažinti cementinės tešlos vandens poreikį nenaudojant plastifikatorių.

**Nano-SiO<sub>2</sub> priedas.** Didėja susidomėjimas nanodalelių savybėmis ir jų panaudojimu daugumoje sričių, kuriose kuriamos naujos medžiagos su naujomis funkcijomis ir unikaliomis fizikinėmis bei cheminėmis savybėmis. Į cementines statybines medžiagas pridėjus nanodalelių, bus suformuotos naujos medžiagos, kurios turėtų išspręsti kai kurias sunkiai išsprendžiamas statybinių medžiagų problemas. Vienas tokių priedų yra nano-SiO<sub>2</sub>. Nano-SiO<sub>2</sub> dalelių dydis  $15\pm 5$  nm, paviršiaus plotas  $160 \cdot 10^3 \pm 20$  m<sup>2</sup>/kg, tankis – 150 kg/m<sup>3</sup> (Li *et al.* 2004a). Šis priedas akivaizdžiai turi aktyvesnes pucolanines savybes nei lakieji pelenai ar šlakai (Valipour *et al.* 2013). Nano-SiO<sub>2</sub> gali reaguoti su kalcio hidroksido (Ca(OH)<sub>2</sub>) kristalais ir sudaryti C-S-H gelį. Naudojant priedą padidėja betono ankstyvasis stipris. Nano-SiO<sub>2</sub> gali veikti kaip nukleatoriai sustiprinantys ryšius tarp cemento hidratų. Dedant mažesnę nano-SiO<sub>2</sub> kiekį, susiformuoja stabili gelio struktūra, kuri pagerina mechanines betono savybes.

Mokslininkai (Zhang, Islam 2012) teigia, kad naudojant nano-SiO<sub>2</sub> priedą, betono su dideliu lakiųjų pelenų ir šlakų kiekiu, sutrumpėja kietėjimo trukmė ir padidėja ankstyvasis stipris. Pridėjus 2 % nanopriedo sumažėja pradinis ir galutinis reakcijos laikas (10 min), padidėja gniuždymo stipris (25 %).

**Pluoštiniai priedai.** Pluoštais sustiprintas betonas yra technologiškai svarbus dėl gerų konstrukcinių ir daugiavertinių savybių. Betonų gamyboje naudojami pluoštiniai priedai gali būti labai įvairūs: metaliniai – plieno, sintetiniai – polipropileno, polietileno, nailonino, poliesterino (Silva *et al.* 2005), natūralūs – kokoso, cukranendrių, bananų, medvilnės, ryžių luobelų (An *et al.* 2011). Pluoštai gali būti įvairaus dydžio ir formos. Labai sunku tiksliai nustatyti pluošto apibrėžimą. Amerikos Betono instituto mokslininkai mano, kad pluošto kraštinių santykis (pvz., pluošto ilgis, padalytas iš ekvivalentinio pluošto skersmens) yra tinkamiausias skaitmeninis parametras, kuris apibūdina pluoštą. Tūriniam betono armavimui daugiau naudojami plieno pluoštai, tačiau jiems savo populiarumu ir efektyvumu nenusileidžia kiti minėti pluoštai (Badr *et al.* 2000; Brandt 1996; Mikulskis 2007).

(Silva *et al.* 2005) šaltinyje teigiama, kad cementinėse medžiagose polietilininiai pluoštiniai priedai reaguoja su Ca(OH)<sub>2</sub>. Po reakcijos plaušelių paviršius tampa šiurkštus. (Silva *et al.* 2005) teigia, kad nagrinėti polimeriniai priedai ne-

turi poveikio cementinio skiedinio gniuždymo, lenkimo ir tempimo stipriui, jie tik padidina cementinio skiedinio kietumą.

Savo efektyvumu ir savybėmis metaliniams ir polimeriniams pluoštams nenusileidžia ir anglies pluoštas. (Černý *et al.* 2007) teigia, kad iš pradžių anglies pluoštas buvo naudojamas automobilių ir lėktuvų pramonėje polimerinei matricai sustiprinti. Anglies pluoštas, pakeitęs anksčiau naudotą stiklo pluoštą, pagerino stiprumo savybes, sumažino tempimo deformacijas. Pradžioje buvo daugiausiai naudojamas jo pirmtakas poliakrilonitrilas, kuris turi tokias pačias geras savybes kaip ir anglies pluoštas, bet yra gana brangus. (Zhang, Sun 2012) straipsnyje nagrinėjamos betono, armuotojo plieno, anglies bei sintetinio polivinilalkoholio pluoštais, elektromagnetinių bangų sugerties savybės. Tyrimai parodė, kad didinant puošto kiekį sustiprinamas elektromagnetinio skydo efektyvumas. Nagrinėjami pluoštai padidina betono mikrobangų absorbcijos savybes. Iš visų priedų geriausias sugerties savybes turi anglies pluoštas.

Anglies pluoštas, betonuose dažniausiai naudojamas kaip armavimo priedas, kuris pagerina jų stiprumo savybes, ypač lenkimo ir gniuždymo stiprius. (Ji 2005) šaltinis teigia, kad šis priedas naudojamas kaip tiltas, sujungiantis porų sienelės ir taip užtikrinantis apkrovos perdavimą tarp tuštumų, kad neatsirastų plyšių tempimo metu.

AAB gamyboje dažniausiai naudojami šie priedai: anglies pluoštas (Laukaitis 1999), stiklo pluoštas (Sinica 2001), kaolino vata, bazalto vata, polipropileno pluoštinis priedas (Mikulskis 2007) ir kt. Nemažai tyrimų buvo atlikta nagrinėjant pluoštinių priedų poveikį akytojo betono formavimo mišinių savybėms ir stiprio charakteristikoms (Laukaitis *et al.* 2009; Mikulskis 2007 ir kt). (Han *et al.* 2011) teigia, kad kuriamos naujos statybinės medžiagos su įvairiais priedais turėtų būti daugiafunkciai kompozitai. Vienas tokių priedų yra anglies pluoštas. (RILEM technical 1978) teigia, kad anglies pluoštas yra atsparus vandeniui (ne tirpus vandenyje), rūgštims, šarmams. Tai rodo, kad AAB su anglies pluošto priedu galėtų būti daugiafunkcė medžiaga. Minėti priedai ne tik sustiprina matricą, bet jie padeda nustatyti gaminio defektus, jo nesuardant. Betonius su anglies pluoštu galima naudoti kaip elektromagnetinių bangų sugėriklius.

Darbe (Laukaitis *et al.* 2010) nustatyta, kad AAB formavimo mišinyje esanti skystoji fazė, prieš sukietėdama, labai tolygiai sudrėkina anglies pluošto paviršių ir su anglies pluošto paviršiumi besiliečiančiame rišamosios medžiagos sluoksnyje, jai kietėjant, vyksta kristalizacija, todėl susidaro labai glaudūs ryšys tarp anglies pluošto ir rišamosios medžiagos. Anglies plaušelis tarsi apauga adalėlių formos kalcio hidrosilikatais, todėl pagerina AAB stiprumo charakteristikas.

(Al-Saud *et al.* 2011) šaltinyje buvo nagrinėjami du anglies pluošto pridėjimo į cementinį skiedinį būdai: pirmasis, kai anglies pluoštas buvo sumaišomas vandenyje ir išsklaidomas ultragarsiu smulkių dalelių sklaidikliu, o antrasis, kai

anglies pluoštas malamas su cementu. Nustatyta, kad pridėjimo būdas neturi poveikio betono savybėms, bet antruoju atveju priedas turėjo pakeisti savo struktūrą, nes buvo malamas su cementu. (Al-Saud *et al.* 2011) teigia, kad bet kuriuo atveju didžiausias gniuždymo stipris gautas į mišinį pridėjus 0,05 % priedo cemento masės. Autoriaus nuomone, taip yra dėl to, kad toks priedo kiekis yra geriausias cemento pastos kristalinės hidratų struktūrai susidaryti. Didesnis priedo kiekis, daro neigiamą poveikį, t.y. sulėtina cemento hidratacijos procesus.

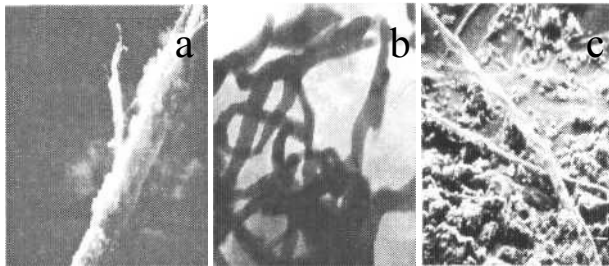
**Nanopluoštinis priedas.** Pluoštiniai priedai dažniausiai naudojami, gaminio lenkimo ir gniuždymo stipriams didinti. Ilgų (iki 5 mm) priedų atveju didžiausias pokytis matomas tik didėjant lenkimo stipriui, o gniuždymo stipris kinta nedaug arba mažėja. Daug mokslininkų (Vauchskii 2004; Yakovlev 2006; Artamonova *et al.* 2006; Pukhareno *et al.* 2006; Korolev *et al.* 2006; Lotov 2006; Komokhov, Aleksandrov 2008; Chernyshov, Korotkikh 2008; Campillo *et al.* 2003; Sobolev, Ferrada-Gutierrez 2006; Middendorf, Singh 2006; Yakovlev *et al.* 2006, 2009) nagrinėjo statybinių medžiagų gamybos problemas, susijusias su betonais, kuriuose naudojami nanopriedai.

(Chung 2004) autorius nagrinėja anglies nanopluošą. Jis pirmiausia buvo pradėtas naudoti lėktuvų ir palydovų gamybai. Nesmulkinti anglies pluoštiniai priedai yra plačiai naudojami polimerinių matricų kompozituose bei betonuose. Nanopriedas negali konkuruoti su nesusmulkintu lenkimo stiprį gerinančiu anglies pluoštu. Trumpi anglies nanopluoštai kaip armatūra yra mažiau efektyvūs kompozitinėms medžiagoms.

Cementinių skiedinių su anglies nanopluoštais savybės vis dar tik pradėdamos tirti (Campillo *et al.* 2003; Sobolev, Ferrada-Gutierrez 2006; Middendorf, Singh 2006; Yakovlev *et al.* 2006, 2009; Staroverov *et al.* 2009). (Zhdanok *et al.* 2009; Batyanovskii *et al.* 2009, 2010) mokslininkai nustatė, kad nedidelis priedo kiekis (0,05–0,1 % nuo cemento masės), įdėtas į cementinį skiedinį ženkliai veikė jo struktūrą.

(Kerienė 2006) tyrė metalo turinčius anglies nanovamzdelius, kurie buvo gauti antracena, fenilantracena arba jų mišinį kaitinant 127–297 °C temperatūroje su išlydytu chloridu vieno iš šių metalų: aliuminio, vario, kobalto, mangano, chromo. Gautas bandinys – cilindro formos 1–30 μm skersmens nanovamzdelių pluošto pavidalo agregatas, sudarytas iš didžiulio kiekio iki 100 nm skersmens nanovamzdelių (1.2 pav., a). Pradėjus sklaidyti daleles ultragarsu, agregatai pradėjo skirstytis į mažesnius agregatus (1.2 pav., b) ir po ilgesnio išsklaidymo laiko visai suiro, plaušeliams visiškai atsiskiriant (1.2 pav., c). Metalų turintys anglies nanovamzdeliai yra atsparūs šarmams, todėl (Kerienė 2006) atliko jų naudojimo bandymą neautoklaviniame putų cementbetoniui armuoti. Pridėjus išsklaidyto ir hidrofilizuoto nanovamzdelių pluošto 0,05 % (skaičiuojant nuo žaliavų mišinio masės), putų cementbetonio, kurio tankis iki 350 kg/m<sup>3</sup>, gniuž-

dymo stipris padidėjo 70 % (nuo 0,18 MPa iki 0,31 MPa), palyginti su betono, neturinčio priedo, gniuždymo stipriu. Putų cementbetonio, kurio tankis –  $500 \text{ kg/m}^3$ , 0,05 % pluošto priedas gniuždymo stiprį padidino 66 % (nuo 0,87 MPa iki 1,45 MPa). Nustatyta, kad nanovamzdelių pluošto priedas lemia putų cementbetonio porų dydžių skirtumo sumažėjimą ir jų sienelių vientisumo padidėjimą (susidaro mažiau perforuotos porų sienelės). Nanovamzdelių priedas lemia putų cementbetonio struktūrą ir tuo pačiu šilumos laidumo sumažėjimą nuo  $0,07 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  iki  $0,056 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ .



**1.2 pav.** Metalo turinčių anglies nanovamzdelių pluoštas: a – pluoštiniai nanovamzdelių dariniai (agregatai); b – pradėjęs skirstytis agregatas; c – pavieniai nanovamzdeliai (Kerienė 2006)

**Fig. 1.2.** Carbon nanotube fibers containing metal: a – nanotube fibrous structures (aggregate), b – aggregate began to disperse, c – individual nanotubes (Kerienė 2006)

(Kerienė 2006) teigia, kad neautoklaviniuose akytuose betonuose, turinčiuose anglies pluoštinių priedų, plaušelių sukibimą su rišamąja medžiaga lemia plaušelių paviršiaus cheminis aktyvumas betonui kietėjimo metu. Pluoštiniai priedai teigiamai veikia putų betono mechaninį stiprį.

Maži priedų kiekiai reikalauja gero jų pasiskirstymo mišinyje (Chung 2004). (Lee *et al.* 2005) nagrinėjo nanopriedų pasiskirstymą mišinyje. Jis teigė, kad formavimo mišinyje naudojamus smulkius priedus, reikia gerai paskirstyti, nes smulkūs priedai turi didelį savitąjį paviršių ir didelę energiją, kuri traukia daleles vieną prie kitos. Kad priedai mišinyje gerai pasiskirstytų, dedama paviršių aktyvinanti medžiaga. Sumaišius šias sudedamąsias dalis su vandeniu, dalelės pasiskirsto tolygiai ir nesukimba.

(Quercia *et al.* 2012) teigia, kad gaminant betonus su nano- ar mikrodalelėmis galima sutrumpinti technologinį procesą, nes priedai paspartina rišamųjų medžiagų hidratacijos reakciją. Priedai didina porų ir kapiliarų kiekį, bet mažina porų skersmenį. Kuo mažesnės priedo dalelės, tuo greičiau įvyksta reakcija, bet kartu ir didėja gaminio džiūstamoji susitrauktis, todėl prieš parenkant nano- ar mikropriedus cementiniams gaminiams, reikia atsižvelgti į minėtus aspektus.

### 1.3. Priedų poveikis tankių ir akytųjų betono savybėms

**Priedų naudojimas tankiuosiuose betonuose.** Pagrindinė tankių betonų savybė yra jų stipris, todėl lenkimo, tempimo ir gniuždymo stipriams padidinti į juos dedama įvairių priedų.

(Kar *et al.* 2012) teigiama, kad į betono mišinį pridėjus lakiųjų pelenų, šlakų ar  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių padidėja C-S-H susidarymas. (Kar *et al.* 2012) darbe pateiktas C-S-H kiekio nustatymo metodas. Cemento skiediniuose, naudojant skirtingus priedus ir nustačius skiedinio kietėjimo metu susidariusį C-S-H kiekį, galima prognozuoti jo stiprumo savybes. (Kar *et al.* 2012) šaltinyje buvo nagrinėjamos tokios sudėtys: cementas be priedų, cementas su  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis, cementas su lakiaisiais pelenais ir  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis. Juose buvo apskaičiuojamas C/S santykis. Didžiausias C-S-H kiekis gautas dalį cemento pakeitus lakiaisiais pelenais ir  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis.

(Kjellsen *et al.* 1999) nustatė, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės teigiamai veikia tankiojo betono ir formavimo mišinio savybes. (Kjellsen *et al.* 1999) taip pat nustatė, kad labai svarbus geras  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių pasiskirstymas mišinyje. Gera pasiskirstymas mišinyje minėtą priedą padidėja ne tik mišinio, bet ir betono stipris. Manoma, kad betono stipris padidėjo ne tik dėl gero  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių pasiskirstymo formavimo mišinyje, bet ir dėl sustiprėjusio ryšio tarp sudedamųjų medžiagų. Šaltiniuose (Shi, Day 2000a, 2000b; Leškevičienė *et al.* 2005) teigiama, kad betonuose efektyviausias šio priedo kiekis yra 15 % cemento masės, bet jo kaina pakankamai didelė, todėl dažniausiai jo dedama ne daugiau kaip 5 %.

Betonuose dažniausiai naudojami metaliniai pluoštiniai priedai, bet jie yra neatsparūs korozijai. Vienas iš korozijai atsparių priedų – anglies pluoštas. Betono su anglies pluoštu gaminiai gali būti daugiafunkčiai. (Giner *et al.* 2012) teigiama, kad anglies pluošto priedai nedaug sumažina gniuždymo stiprį, tačiau gerina kitas betono savybes, pvz., didina lenkimo stiprį, mažina susitrauktį.

Nanodidžio medžiagų atėjimą į betono industriją paskatino gauti rezultatai, kurie suteikė pagrindą gilintis apie tokių medžiagų makro- ir mikrostruktūrą (Said *et al.* 2012). Naudojant nano- $\text{SiO}_2$  priedus betone labai pagerėjo eksploatacinės savybės. Nano- $\text{SiO}_2$  pagreitindami hidratacijos reakciją padidino gniuždymo stiprį. (Said *et al.* 2012) autorius lygina kaip betono savybes veikia lakiųjų pelenų ir nano- $\text{SiO}_2$  priedai, nustatyta, kad betono su lakiaisiais pelenais gniuždymo stipris didėjo labai lėtai, o su nanopriedu stipris yra didesnis visu kietėjimo laikotarpiu. Nanopriedai mažina laidumą vandens garams ir porų kiekį. (Ji 2005) šaltinyje teigiama, kad betono su nano- $\text{SiO}_2$  priedu formavimo mišinys yra kibesnis nei betono be priedo. Dėl to betonuose su minėtu nanopriedu, susidaro vienodesnė ir kompaktiškesnė mikrostruktūra. Nano- $\text{SiO}_2$  priedas suartina  $\text{Ca(OH)}_2$  kristalus, taip susidaro glaudus ryšys tarp matricos ir užpildų. Toks

mikrostruktūros pokytis lemia betono mechaninių savybių ir ilgalaikiškumo pagerėjimą.

**Priedų naudojimas skiediniuose.** (Papadakis *et al.* 1999) teigia, kad per pastaruosius metus dėl technologinių ir ekonominių priežasčių naujos medžiagos, turinčios pucolaninių savybių, buvo maišomos su cementu. Tam tikslui naudojama daug pramoninių atliekų, pvz., lakieji pelenai, šlakai,  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės, bei kai kurios gamtinės aktyvios medžiagos, pvz., vulkaninis tufas.

Cementinių skiedinių gamyboje dažnai naudojami lakieji pelenai ar šlakai (Wang, Lee 2012). Į cemento skiedinius dedami šlakai, kietėjimo metu reaguoją su rišamąją medžiaga ir padidina terminį gaminių atsparumą (Aziz *et al.* 2012). Šio priedo buvo naudojama 10–50 % kietųjų medžiagų masės. Gaminių, kietinamų 120 parų 25–100 °C temperatūroje, stipris didėjo atitinkamai didėjant kietinimo temperatūrai. Gniuždymo stipris pradėjo padidėti jau 35 °C temperatūroje, nes hidratų produktai užpildo atviras poras. Didinant temperatūrą cemento skiedinių stipris didėjo, tad keliant kietinimo temperatūrą galima sumažinti kietinimo trukmę. Tokie cementiniai skiediniai su gana dideliu priedų kiekiu gali būti naudojami aukštesnėse temperatūrose.

(Wongkeo *et al.* 2012b) šaltinyje buvo nagrinėtas cemento skiedinys, kuriame dalis cemento masės buvo pakeista lakiaisiais pelenais arba  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis. Didžiausias stipris gautas naudojant  $\text{SiO}_2$  mikrodulkes, lyginant su cemento skiediniais be priedų arba su lakiųjų pelenų priedu. 10 % cemento masės pakeitus  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis ir esant vandens temperatūrai 25 °C, 40 °C arba 60 °C, ankstyvosiose stadijose gniuždymo stipris didėja. Didinant mikrodulkių kiekį atitinkamai mažėja cemento skiedinių poringumas, didėja tankis ir gniuždymo stipris. Natūraliomis sąlygomis kietinto cemento skiedinio su priedais gniuždymo stipris buvo mažesnis nei skiedinio be priedų, o jei kietinimo metu cemento skiedinio gaminiai buvo kaitinami, tai didėjant temperatūrai didėjo ir gniuždymo stipris.

Skiediniuose, kuriuose kaip rišamoji medžiaga – naudojamos kalkės, užtenka ir nedidelio (iki 5 %)  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių kiekio (Zelić *et al.* 2009).  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės dėl pucolaninių savybių hidratacijos metu padidino C-S-H kiekį, taip padidindamos cementinio skiedinio ilgalaikiškumą ir stiprį.

Cementiniuose skiediniuose dažniausiai naudojami mikropriedai, tačiau (Li *et al.* 2004a, Li *et al.* 2004b) autoriai išnagrinėjo cementinius skiedinius su nanopriedais: nano- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ir nano- $\text{SiO}_2$ . Minėti nanopriedai padidino cementinio skiedinio gniuždymo ir lenkimo stiprius, lyginant su skiediniu be priedų, esant tam pačiam vandens ir rišamųjų medžiagų santykiui. (Jo *et al.* 2007, Li *et al.* 2004a) teigia, kad nanopriedai naudojami ne tik kaip inertinis užpildas, bet ir kaip priedas skatinantis pucolanines reakcijas, kuris gerina cementinių skiedinių

mikrostruktūrą. Šaltinis teigia, kad naudojant nano- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ar nano- $\text{SiO}_2$ , dėl reakcijos su rišamąja medžiaga, padidėja gniuždymo ir lenkimo stipris.

(Černý *et al.* 2007) teigia, kad nebrangaus anglies pluošto atsiradimas 1980 metais vedė prie didelio įvairiapusiško šios medžiagos naudojimo. Cementinių skiedinių su anglies pluoštu mechaninės savybės buvo daugelio mokslininkų darbų interesų centre. Pagrindinis jų tikslas – pagerinti cementinės matricos tempimo ir lenkimo stiprius. (Garcés *et al.* 2005) šaltinyje nustatyta, kad geriausias anglies pluošto priedo kiekis, kuris padidino cemento skiedinio tempimo stiprį, yra 0,5 % nuo cemento masės.

(Han *et al.* 2011) teigia, kad anglies nanovamzdeliai vienas iš daugiausia pranašumų turinčios nanoarmuojančios medžiagos. Mažo dydžio, mažo tankio, unikalių fizikinių ir cheminių savybių derinys daro juos puikiais armavimo priedais, kurie cementinius skiedinius padaro daugiafunkčius. Minėti nanopriedai pagerina cementinių skiedinių gamybos metodus, mechanines savybes, elektromagnetinių bangų sugertį, šilumos laidumą ir vibracijų slopinimo savybes.

**Priedų naudojimas kaitrai atspariuose betonuose.** Daug tyrimų atlikta  $\text{SiO}_2$  mikrodulkes naudojant kaitrai atspariuose betonuose (Stonys 2003; Goberis, Antonovič 2007; Goberis *et al.* 2007). Gaminant betoną su  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis pucolaninė reakcija vyksta, kai amorfinis  $\text{SiO}_2$ , kurio paprastai būna apie 90 %, sujungia tirpale esantį  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės keičia cemento kietėjimo procesą ir modifikuoja betono mikrostruktūrą – padaro ją homogenišką, sumažina didelių porų skaičių, nesikeičiant tam pačiam bendram poringumui kaip ir betonų be priedų, sumažina laidumą vandens garams (tai galima paaiškinti didesniu uždarytų porų kiekiu) taip pat padidina betono stiprį ir ilgalaikiškumą (Vektaris, Vilkas 1999).

(Stonys 2003) savo disertaciniame darbe nustatė, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių kiekis veikia kaitrai atsparaus kompleksinio rišiklio, susidedančio iš aluminatinio cemento, natrio silikato tirpalo ir metalurginio šlako, charakteristikas. Betono mišinio kompozicijos su 2 % ir 4 %  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių kiekiais tankinamos vibruojant, o padidinus  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių kiekį iki 6 % ir 8 % pasireiškia dilatantinės mišinio savybės, todėl mišinį galima sutankinti tik plūkiant. (Stonys 2003) sukūrė kaitrai atsparų plūkiamąjį betono mišinį, kuris gali būti naudojamas šiluminių agregatų naujoms išklojoms įrengti ir remontuoti, bei kurio gaminių gniuždymo stipris po kietėjimo yra keturis kartus didesnis.

(Pundienė 2000) sukūrė mažacementį kaitrai atsparų betoną, kuriame yra 5 % aluminatinio cemento, naudojant didelio poringumo (vandens įmirkis nuo 12 iki 15%) šamoto atliekas bei  $\text{SiO}_2$  mikrodulkes (nuo 5 % iki 16 %) ir natrio pirofosfato priedą (0,3 %). (Pundienė 2000) teigia, kad cemento hidratacijos laipsnis rišiklio mišinyje priklauso nuo  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių kiekio. Didėjant  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių dalelių kiekiui, vandens sąveika su cemento dalelėmis blogė-

ja ir kalcio hidroaluminatų susidaro mažiau. (Pundienė 2000) nustatė, kad pagrindinių kaitrai atsparių mažacemenčių betonų savybių (tankis, gniuždymo stipris, deformatyvumas, atviras poringumas ir ultragarso impulso greitis) poveikio nuo degimo temperatūros bei  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių kiekio dėsningumą. Didžiausiu terminiu patvarumu pasižymi betonas su 5 %  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių.

(Pundienė 2000; Stonys 2003) autoriai naudodami  $\text{SiO}_2$  mikrodulkes pagerino kaitrai atsparių betonų termines bei stiprio savybes, bet naudojo gana didelius priedo kiekius.

**Priedų naudojimas lengvuosiuose betonuose.** (Wongkeo *et al.* 2012a; Wongkeo, Chaipanich 2010) šaltiniuose nagrinėjo lengvąjį betoną su lakiaisiais pelenais ( $1400\text{--}1700\text{ kg/m}^3$  tankio) kietintas 6 h autoklave ir 7 h natūraliomis sąlygomis. Nustatyta, kad su tyrimuose naudotu didžiausiu kiekiu (30 %) minėto priedo stipris padidėjo 20 %, tačiau padidėjo (6 %) šilumos laidumas. Autoklavinis kietinimas stipriai veikė struktūros susidarymą ir gerino stiprumo savybes. (Wongkeo, Chaipanich 2010) nustatė, kad kietinto autoklave lengvojo betono savybėms panašų poveikį daro ir  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės, tik gautų gaminių tankis buvo mažesnis, o stiprumo savybės geresnės, nes kietinimo metu  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės reaguoja su rišamąja medžiaga ir skatina C-S-H susidarymą. Daroma išvada, kad panaudojus tokį priedą autoklaviniame akytajame betone, jie pagerintų ne tik stiprumo savybes, bet ir nepakeistų poringosios struktūros, kuri yra svarbi šilumos laidumui. Tokiu atveju AAB būtų efektyvesnis nei lengvasis betonas.

Skyrelyje „Priedų naudojimas tankiuosiuose betonuose“ buvo minėtas 5 %  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių kiekis betonuose. Šiek tiek kitaip minėtas priedas veikia lengvuosius betonus ( $850\text{ kg/m}^3$ ). Į juos  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių dedama mažiau ir gaunamas toks pat efektas, nes amorfinio  $\text{SiO}_2$  turintys priedai dalyvauja reakcijoje su kalkėmis, ir ši reakcija lemia C-S-H susidarymą (Sinica *et al.* 2009). Šie dariniai gerina stiprumo savybes, o tai yra labai svarbu lengviesiems betonams, kurių stipris yra mažesnis nei tankiųjų betonų.

Lengvuosiuose betonuose taip pat naudojami ir pluoštiniai priedai. (Oskouei *et al.* 2011) šaltinyje teigiama, kad anglies ir stiklo pluoštai mažina lengvojo betono matmenų nuokrypius, išsiskrypimą, kraštinių išsilenkimą bei didina stiprį.

**Priedų naudojimas neautoklaviniuose akytuosiuose betonuose (NAB).** NAB sudarytas iš cementinės matricos ir tuštumų ( $300\text{--}1000\text{ kg/m}^3$  tankio). (Kearsley, Wainwright 2001) teigiama, kad šių dviejų minėtų komponentų savybės turi apčiuopiamą poveikį NAB savybėms. Kadangi NAB yra lengva, mažo tankio medžiaga, tai naudojami įvairūs priedai, kurie gerintų jų stiprumo savybes. (Kearsley, Wainwright 2001) šaltiniuose nagrinėjama, kad didelį kiekį (75 %) cemento masės pakeitus lakiaisiais pelenais, ir nekeitus vandens ir riša-

mųjų medžiagų santykio (kad būtų galima nustatyti lakiųjų pelenų efektą) padidėjo NAB gniuždymo stipris. NAB be priedų stiprį įgauna greičiau nei dalį cemento pakeitus lakiaisiais pelenais, tačiau galutinis stipris gaunamas didesnis, bet pailgėja technologinis procesas.

(Narayanan, Ramamurthy 2000a) teigia, kad mikrostruktūros tyrimais galima paaiškinti NAB gaminių gniuždymo stiprio pokyčius. NAB struktūros pokyčiai yra svarbūs visoms savybėms. Šis šaltinis teigia, kad NAB gaminių struktūra keičiasi naudojant smėlį ir lakiuosius pelenus, tai įvyksta dėl vykstančio skirtingo hidratacijos laipsnio ir hidratavimosi laiko. Naudojant lakiuosius pelenus, hidratacijos procesas sulėtėja, tačiau priedai apauga C-S-H taip sudarydami kristalizacijos centrus. NAB kietinimo metu struktūra keičiasi viso kietėjimo laikotarpiu, tai didelis minusas technologinio proceso trukmei. Kietinimo metu susidaro gelinės fazės C-S-H, kuris neužtikrina gerų stiprumo savybių. (Arreshvhina *et al.* 2006) šaltinis teigia, kad NAB naudojant aukštakrosnių šlaką, taip pat susiformuoja didesnis mikrostruktūros kristališkumas ir gniuždymo stipris padidėja 63 %.

(Kuhanandan Nambiar, Ramamurthy 2007b) šaltinis teigia, kad yra sukurti keli paprasto cemento tešlos, skiedinio ar betono stiprio prognozavimo ryšiai. Gaminant NAB, jo stiprio prognozavimas pakankamai sudėtingas. Tai priklauso nuo porų, esančių visame gaminio tūryje. Todėl nustačius NAB su priedais stiprumo savybes, rezultatus reikia statistiškai apdoroti, paskui išreikštos lygtys pagal naudojamą priedą ir jo kiekį padės prognozuoti NAB stiprį.

NAB, kaip ir įprastame betone, kietėjimo proceso pradžioje vyksta amorfinės būklės hidrosilikatų susidarymas ir nanostruktūros formavimasis, taigi galima tikėtis, kad ir NAB savybes galima būtų pakeisti naudojant  $\text{SiO}_2$  mikrodulkes (Laukaitis *et al.* 1999).  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės yra mažo tankio ( $630 \text{ kg/m}^3$ ), turi didelį amorfinio  $\text{SiO}_2$  kiekį (90–92 %), kuris skatina betono kristalinės struktūros susidarymą (Laukaitis *et al.* 1999). Šios savybės rodo, kad tai galėtų būti potencialus NAB priedas (Davraz, Gunduz 2005). Tačiau neautoklavinio kietinimo metu NAB gaminyje su  $\text{SiO}_2$  mikrodulkėmis susidaro tik gelinės fazės C-S-H (Mostafa 2005). (Matsui *et al.* 2011) teigia, kad iš pradžių susidarančių C-S-H struktūra yra labai svarbi vėlesniam kristalinės struktūros formavimuisi.

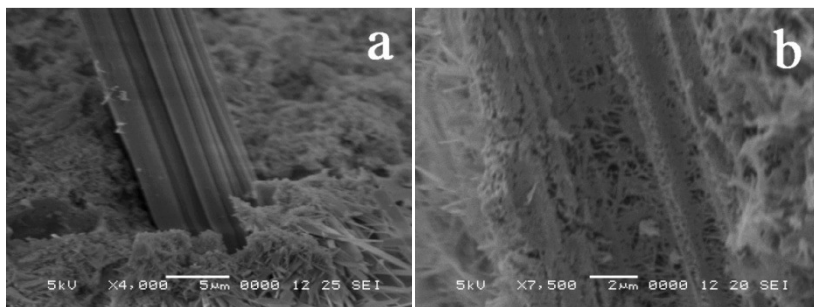
NAB taip pat naudojami ir pluoštiniai priedai. Tinkamiausias toks priedas yra anglies pluoštas, nes jis yra stiprus, lengvas ir atsparus korozijai (Laukaitis 2000). Su tokiu priedu NAB ne tik, nepraranda savo gerų šiluminių savybių, bet ir pagerėja jų stiprumo savybės, tačiau naudoti priedai buvo malami su šlamu, todėl sunku nustatyti sumalto pluošto ilgį.

**Priedų naudojimas autoklaviniuose akytuosiuose betonuose (AAB).** (Mostafa 2005) tyrė, kaip 50 % kalkių ir smėlio masės pakeitus šlakais, pasikeis AAB savybės. Atlikti makrostruktūros tyrimai parodė, kad smėlio dalelės apau-

ga C-S-H, taip sudarydamos stiprų karkasą, padidindamos galutinio gaminio mechanines savybes. Autorius teigia, kad naudojant pucolaninius priedus būtų galima sutrumpinti kietinimo laiką ir mažinti rišamųjų medžiagų kiekį, tokiu būdu sumažėtų energijos sąnaudos. Tačiau, (Hauser *et al.* 1999) autorius teigia, kad lakieji pelenai sulėtina C-S-H fazės susidarymą AAB, todėl mažėja gaminių stipris.

(Huang *et al.* 2012) šaltinyje buvo nagrinėjama kaip vario atliekos veikia AAB savybes. Nustatyta, kad gaminių su priedais gniuždymo stipris padidėjo iki 4 MPa, esant 610 kg/m<sup>3</sup> tankiui. Stiprio padidėjimas aiškinamas tuo, kad dauguma vario atliekose esančių mineralų dalyvauja hidratacijos reakcijoje, taip autoklavinio kietinimo metu sudarydami plokštelinės formos tobermoritus. Tokiu atveju būtų galima sumažinti rišamosios medžiagos kiekį reikalingą AAB gamybai.

(Ayudhya, Ungkoon 2011) straipsnyje teigiama, kad tinkamiausias AAB priedas yra anglies pluoštas. Jis gaminiams suteikia pakankamą stiprį ir yra atsparus korozijai, nes šis priedas yra mažo tankio, neturi didelio poveikio AAB tankio pokyčiams. (Laukaitis *et al.* 2009) straipsnyje nagrinėta, kaip nemaltas hidrofilizuotas ir nehidrofilizuotas anglies pluoštas veikia AAB formavimo mišinio ir sukietėjusio betono stiprumo savybes (1.3 pav.).



**1.3 pav.** AAB, turinčio anglies pluošto priedą, mikrostruktūros fragmentai: a – anglies plaušelis AAB skėlimo paviršiuje; b – rišamosios medžiagos sąlyčio su anglies plaušelių paviršius, atsidengęs AAB skėlimo metu išsipešus plaušeliui iš sukietėjusios rišamosios medžiagos

(Laukaitis *et al.* 2009)

**Fig. 1.3.** Fragments of microstructure of AAB fracture surface: a – AP pulled out from hardened binding material during AAB fracture, b – microstructure of binding material contacted during hardening with AP filament surface and opened when AP filament is pulled out during AAB fracture (Laukaitis *et al.* 2009)

Nustatyta, kad abiem atvejais priedas mažina formavimo mišinio sklidumą, išsipūtimo temperatūrą, tačiau didina plastiškąjį, sukietėjusio betono gniuždymo

ir lenkimo stiprius. Tačiau yra sudėtingas tokių priedų kryptingas pasiskirstymas mišinyje. (Laukaitis *et al.* 2009) nustatė, kad AAB formavimo mišinyje esanti skystoji fazė, prieš sukietėdama, labai gerai sudrėkina anglies pluošto plaušelių paviršių ir kad su anglies plaušelio paviršiumi besiliečiančiame rišamosios medžiagos sluoksnyje jai kietėjant vyksta kalcio hidrosilikatų kristalizacija. 1.3 paveiksle pateikti mikrostruktūros tyrimų rezultatai. (Laukaitis *et al.* 2009) aki-vaizdžiai rodo, kad AAB ardymo metu, išplėšus anglies pluoštą, atsiveria sąlyčio zonos tarp rišamosios medžiagos ir anglies pluošto paviršiaus mikrostruktūros. 1.3 paveiksle matoma, kaip susidaro labai glaudus sąlytis tarp rišamosios medžiagos ir anglies pluošto paviršiaus, t.y. sąlyčio tarp rišamosios medžiagos ir anglies pluošto paviršiaus reljefas tiksliai atkartoja anglies pluošto paviršiaus reljefą. Rišamosios medžiagos sluoksnyje, kontaktuojančiame su anglies pluošto paviršiumi, susidaro adatiniai kalcio hidrosilikato kristalai.

(Laukaitis 1999) šaltinyje anglies pluoštą malė su šlamu. Nustatyta, kad geriausias minėto priedo kiekis, kuris didina stiprumo savybes, yra 0,2 % kietų medžiagų masės, tačiau sunku nustatyti tokiu būdu malto anglies pluošto ilgį.

## 1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Daug autorių tyrė  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių priedą ir tai, kaip jis veikia tankiuosius ir poringuosius betonus. Literatūros šaltiniuose teigiama, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkės gerina betono gaminių stiprumo savybes, mažina tankiųjų betonų sklidumą ir skatina mikrostruktūros kristališkumą. Tačiau tyrimų, kaip šis priedas veikia AAB savybes, yra nedaug. Tyrimų apie poveikį AAB formavimo mišinių savybėms, sukietinto AAB struktūros formavimuisi ir savybėms, hidratinių naujadarų susidarymui nėra.
2. Išnagrinėjus surinktą mokslinę literatūrą apie AAB armavimą pluoštiniais priedais, matyti, kad mažo tankio ( $450 \text{ kg/m}^3$ ) AAB galima armuoti pluoštiniais priedais. Svarbiausia tai, kad pluoštiniai priedai padidino AAB stiprį. AAB daugiausiai naudojamas sieninėse konstrukcijose, kuriuose veikia ilgalaikės apkrovos, todėl svarbiausia AAB mechaninė savybė – gniuždymo stipris, tad ir šiame darbe daugiau dėmesio skiriama gniuždymo stiprio padidinimui. Daugelyje šaltinių nagrinėtas mechanškai neapdorotas arba trintas anglies pluoštas, kurio plaušelio ilgis ~5 mm. Nebuvo aptikta straipsnių, kuriuose būtų nagrinėjama, kaip toks pluoštas galėtų keisti AAB formavimo mišinių ir bandinių savybes, jei jis būtų maltas iki smulkių dalelių (1,0–10,0  $\mu\text{m}$ ).

Remiantis pirmojo skyriaus rezultatų apibendrinimu suformuluoti tokie šio darbo uždaviniai:

- nustatyti geriausias  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedų kiekius;
- ištirti  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedų poveikį autoklavinio akytojo betono formavimo mišinių konsistencijai, didžiausiajai temperatūrai, išsipūtimo aukščiui, plastiškajam stipriui;
- nustatyti minėtų priedų poveikį autoklavinio akytojo betono savybėms (tankiui, makro- ir mikrostruktūrai, fazinei kalcio hidrosilikatų sudėčiai, gniuždymo ir lenkimo stipriams, terminei susitraukčiai, šilumos laidumui, laidumui vandens garams, atsparumui šalčiui);
- parengti modifikuoto autoklavinio akytojo betono su priedais technologinę gamybos schemą.

---

## **Autoklavinio akytojo betono su silicio dioksido mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedais medžiagos ir tyrimų metodai**

Šiame skyriuje aprašomos tyrimams naudotos medžiagos, jų apdorojimo būdai, naudota įranga, bandinių paruošimas, autoklavinio akytojo betono (AAB) su silicio dioksido mikrodulkių (AS) ir malto anglies pluošto (AP) priedais formavimo mišinių savybių bei sukietėjusio AAB stiprio, makro- ir mikrostruktūrų tyrimų, šilumos laidumo, laidumo vandens garams, atsparumo šalčiui nustatymo metodai.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta keturiuose straipsniuose (Balčiūnas *et al.* 2011; Laukaitis *et al.* 2011, 2012; Lekūnaitė *et al.* 2012) ir pristatyta šešiose mokslinėse konferencijose.

### **2.1. Tyrimams naudotos medžiagos**

Kaip rišamoji medžiaga buvo naudotos UAB „Naujasis kalcitas“ maltos nege-sintosios kalcitinės CL90 tipo kalkės, pagal LST EN 459-1 „Statybinės kalkės.

1 dalis. Apibrėžtys, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai“. Pagal LST EN 459-2 „Statybinės kalkės. 2 dalis. Bandymo metodai“, nustatyta gesinimosi trukmė – 5 minutės, gesinimosi temperatūra – 55 °C. Kalkių cheminė sudėtis pateikta 2.1 lentelėje.

**2.1 lentelė.** Naudojamų žaliavų ir priedų cheminė sudėtis

**Table 2.1.** Chemical composition of raw materials and additives

| Naudojamos žaliavos ir priedai | Sudėtis, %       |                                |                                |       |      |                  |                   |                 |                  |      | Kiti, % |
|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|------|---------|
|                                | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | R <sub>2</sub> O | C    |         |
| Kalkės                         | 4,05             | 2,21                           | 0,88                           | 89,24 | 2,38 | –                | –                 | –               | 0,37             | –    | 0,87    |
| Portlandcementis               | 20,76            | 6,12                           | 3,37                           | 63,50 | –    | 1,0              | 0,3               | 0,8             | –                | –    | 4,15    |
| Smėlis                         | 97,89            | 0,60                           | 0,46                           | 0,72  | –    | –                | –                 | 0,06            | 0,10             | –    | 0,17    |
| AP                             | 3,61             | 0,13                           | –                              | 0,26  | 0,09 | –                | –                 | –               | –                | 95,8 | 0,11    |
| AS                             | 98,00            | –                              | 0,05                           | 0,25  | 0,4  | 1,2              | 0,1               | 0,35            | –                | 0,6  | 0,6     |

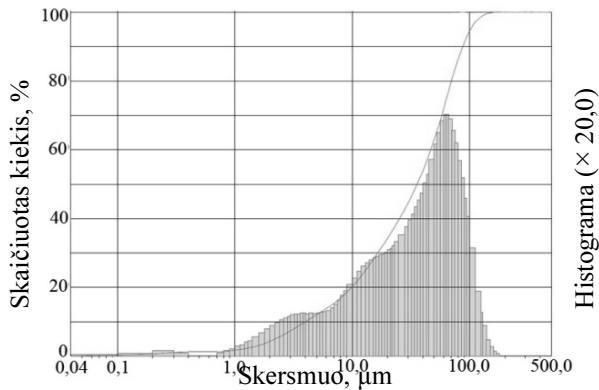
Kaip rišamoji medžiaga taip pat buvo naudotas AB „Akmenės cementas“ CEM I 42,5 R markės portlandcementis, pagal LST EN 197-1 „Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai“ reikalavimus. Portlandcemenčio rišimosi pradžia – 140 min., pabaiga – 190 min., nustatyta pagal LST EN 196-3 „Cementas. Bandymo metodai. 3 dalis. Rišimosi trukmės ir tūrio pastovumo nustatymas“ reikalavimus. Jo savitasis paviršius pagal Bleiną buvo 319 m<sup>2</sup>/kg. Portlandcemenčio tūrio stabilumas (plėtra) nustatytas pagal Le-Chatelier principą – 0,5 mm. Cheminė portlandcemenčio sudėtis nustatyta pagal LST EN 196-2 „Cementas. Bandymo metodai. 2 dalis. Cheminė analizė“ reikalavimus ir pateikta 2.1 lentelėje. Mineralinė portlandcemenčio sudėtis nustatyta pagal Bogue (1955) metodus ir pateikta 2.2 lentelėje.

**2.2 lentelė.** Mineralinė klinkerio sudėtis

**Table 2.2.** Mineral composition of clinker

| Mineralinė klinkerio sudėtis, % |                  |                  |                   |
|---------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| C <sub>3</sub> S                | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
| 58,43                           | 15,38            | 10,50            | 10,25             |

Kaip užpildas naudotas UAB „Anykščių kvarcas“ kvarcinis smėlis. Jis atitiko LST 1273 „Silikatinų ir autoklavinio akytojo betono gaminių smėlis. Techniniai reikalavimai ir bandymų metodai“ reikalavimus. Smėlis buvo malamas rutuliniame malūne iki  $277 \text{ m}^2/\text{kg}$  savitojo paviršiaus, kuris buvo nustatytas Bleino aparatu pagal LST EN 196-6 „Cemento bandymų metodai. 6 dalis. Smulkumo nustatymas“ reikalavimus. Dalelių pasiskirstymas pagal dydį, kuris pateiktas 2.1 paveiksle, buvo atliktas „CILAS 1090“ prietaisu. Nustatyta, kad maltą smėlį sudaro įvairaus dydžio dalelės nuo 0,1 iki  $200 \mu\text{m}$ . Nuo 0,1 iki  $1,0 \mu\text{m}$  didžio sudaro tik apie 1 %, tačiau dominuoja (70 % visų dalelių sudaro) 80–90  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės. 12 % visu dalelių sudaro nuo  $1,0 \mu\text{m}$  iki  $10,0 \mu\text{m}$  dydžio dalelės. Cheminė smėlio sudėtis pateikta 2.1 lentelėje.



**2.1 pav.** Malto smėlio dalelių pasiskirstymas pagal dydį  
**Fig. 2.1.** The distribution of milled sand's particles by size

Kaip dujodaris buvo naudojama aliuminio (Al) pasta „Albo Schlenk Deg 4508/70“, kurios savitasis paviršius –  $1800 \text{ m}^2/\text{kg}$ , grynas aliuminio kiekis pastoje sudaro 70 %.

Siekiant gerai paskirstyti priedus AAB formavimo mišinyje buvo naudotos paviršių aktyvinančios medžiagos (PAM) „Ufapore TCO“ 0,03 % Al pastos masės.

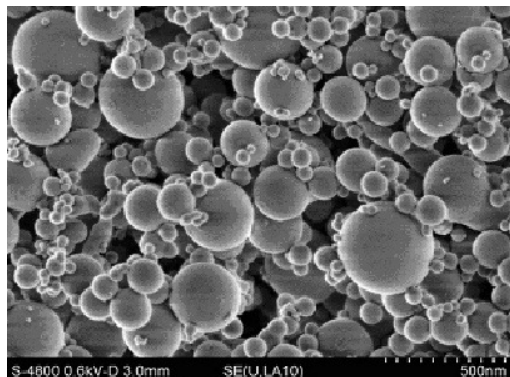
Ruošiant AAB formavimo mišinius buvo naudojami šie priedai:

- $\text{SiO}_2$  mikrodulkės „RW-Füller“ (AS);
- Anglies pluoštas (AP).

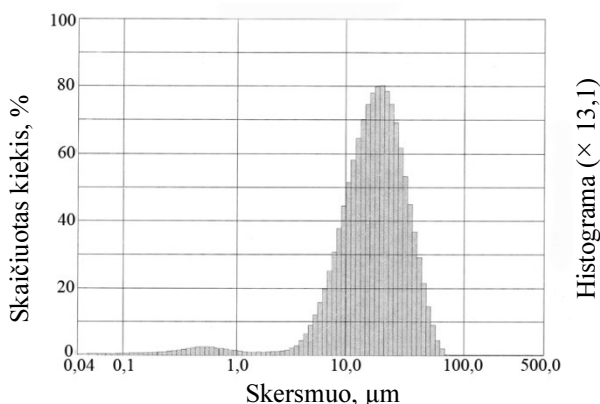
Minėtų priedų cheminė sudėtis pateikta 2.1 lentelėje.

AS priedo dalelių forma ir dydis pateikti 2.2 paveiksle, dalelių pasiskirstymas pagal dydį pateiktas 2.3 paveiksle. Nustatyta, kad naudotą AS priedą sudaro

nuo 0,1 iki 70  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės, dominuoja (80 % visų dalelių) 20–30  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės (2.3 pav.). Nuo 0,1 iki 5,0  $\mu\text{m}$  dydžio sudaro tik apie 5 % dalelių. Cheminė AS sudėtis pateikta 2.1 lentelėje.



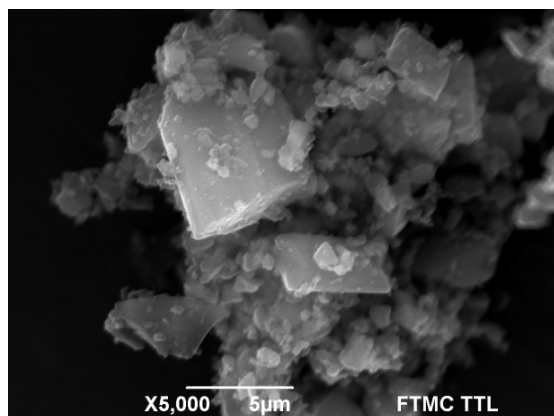
2.2 pav. AS dalelių mikrostruktūra  
Fig. 2.2. Microstructure of AS particles



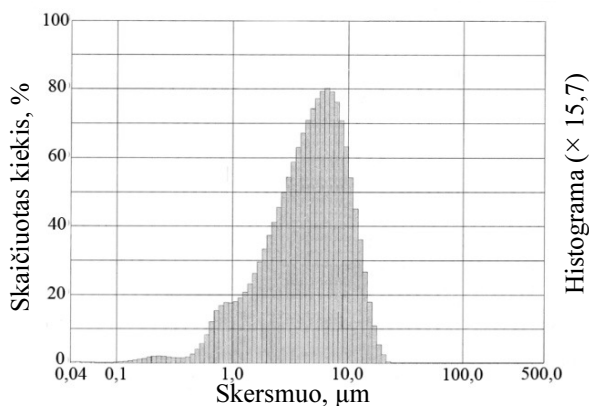
2.3 pav. AS dalelių pasiskirstymas pagal dydį  
Fig. 2.3. The distribution of AS particles by size

AAB formavimo mišiniams ruošti buvo naudoti sausuoju būdu maltas AP. AP buvo maltas 10 val. rutuliniame malūne „Fritsch pulverisette 7“, naudojant 16 mm skersmens agato rutuliukus, 600 aps./min greičiu. AP mikrostruktūra pateikta 2.4 paveiksle. AP dalelių pasiskirstymas pagal dydį pateiktas 2.5 paveiksle. Nustatyta, kad naudotą AP priedą sudaro nuo 0,1 iki 40  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės, dominuoja (80 % visų dalelių) 8–9  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės (2.5 pav.). Nuo

0,1  $\mu\text{m}$  iki 6,5  $\mu\text{m}$  dydžio sudaro tik apie 5 % dalelių. Cheminė AP sudėtis pateikta 2.1 lentelėje.



**2.4 pav.** Malto sausuoju būdu AP priedo morfologija  
**Fig. 2.4.** Morphology of AP additive milled in dry way



**2.5 pav.** Maltų sausuoju būdu AP dalelių pasiskirstymas pagal dydį  
**Fig. 2.5.** The distribution of AP particles milled in dry way by size

Nagrinėjant AP priedą, visų pirma buvo nustatytas geriausias AP priedo mechaninis apdirbimo būdas, tai pateikta (Laukaitis *et al.* 2012) straipsnyje. Jame aptarta, kaip skirtingais būdais smulkintas anglies pluoštas veikia AAB gniuždymo ir lenkimo stiprius. Atlikti tyrimai parodė, kad didžiausias gniuždymo stipris gautas, naudojant šlapiuoju būdu maltą anglies pluoštą, tačiau tolesniems tyrimams buvo pasirinktas technologiškesnis sausiai maltas anglies pluoš-

tas, kuris gniuždymo stiprį padidino 20 %. Didžiausias lenkimo stipris gautas, kai AP priedas buvo nesmulkinamas, kaip ir nurodo dauguma šaltinių (Laukaitis 2000, Mikulskis 2007). Tačiau AAB statyboje dažniausiai naudojamas kaip sieninė konstrukcijos dalis, kurią veikia spaudimo jėga, todėl svarbesnis yra jo gniuždymo stipris, tad, atsižvelgus į gniuždymo stiprio rezultatus, buvo pasirinktas sausuoju būdu maltas AP. Nustatyta, kad sausuoju būdu maltas AP lenkimo stiprį padidino 8 %.

## 2.2. Formavimo mišinių paruošimas ir bandinių formavimas

Priedų kiekiams nustatyti buvo formuojami AAB bandiniai ir pagal formavimo mišinių parametrus bei AAB stiprumo savybes buvo parinkti geriausi priedų kiekiai. PAM kiekis, kuriuo būtų galima išsklaidyti priedų daleles, pasirinktas 0,03 % Al pastos masės. Buvo nustatytas ir pasirinktas geriausias Al pastos kiekis (0,18 %), kuris užtikrino reikiamą formavimo mišinio išsipūtimą ir tankį.

Formavimo mišiniui naudoto vandens temperatūra – 20 °C. V/K, kuris lygus 0,54, pasirinktas atsižvelgiant į formavimo mišinio technologiškumą. AS priedo į formavimo mišinį buvo dedama atitinkamai 0,5 %, 1,0 % ir 1,5 % keičiant smėlio kiekį. AP priedo buvo dedama atitinkamai 0,05 %, 0,1 % ir 0,2 % keičiant smėlio kiekį.

Al pastos, AS ir AP priedų daleles prieš supilant į maišyklę buvo atskirai išsklaidomos 3 min su dalimi vandens ir PAM. Naudotas ultragarso smulkių dalelių sklaidikis „UZDN-21“, dažnis – 22 kHz, talpa – 480 W (2.6 pav.).



2.6 pav. Ultragarso smulkių dalelių sklaidiklis „UZDN-21“

Fig. 2.6. Ultrasonic dispersing device “UZDN-21”

AAB formavimo mišinių sudėtys pateiktos 2.3 lentelėje. Paruoštas formavimo mišinys buvo pilamas į formas. Suformuoti AAB buvo laikomi ~2 h, kol įgavo reikiamą plastiškąjį stiprį, paskui nupjaunamas susidaręs kaupas ir AAB dedamas į autoklavą kietinti. Autoklavo talpa – 100 l, kietinimo režimas 5+10+5 h esant vandens garų temperatūrai 176 °C (tai atitinka 0,8 MPa slėgį).

**2.3 lentelė.** AAB formavimo mišinių komponentų kiekiai 0,01372 m<sup>3</sup> tūriui  
**Table 2.3.** Amounts of components of AAB forming mixtures for 0.01372 m<sup>3</sup> volume

| Komponentai      | Kiekiai, g |        |        |        |        |        |        |
|------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kalkės           | 194,52     | 194,52 | 194,52 | 194,52 | 194,52 | 194,52 | 194,52 |
| Portlandcementis | 19,45      | 19,45  | 19,45  | 19,45  | 19,45  | 19,45  | 19,45  |
| Smėlis           | 580,33     | 577,43 | 574,53 | 571,63 | 579,93 | 579,53 | 578,74 |
| AS priedas       | –          | 2,90   | 5,80   | 8,70   | –      | –      | –      |
| AP priedas       | –          | –      | –      | –      | 0,40   | 0,80   | 1,59   |
| Aliuminio pasta  | 1,43       | 1,43   | 1,43   | 1,43   | 1,43   | 1,43   | 1,43   |
| PAM              | 0,001      | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  |
| Vanduo           | 429,71     | 429,71 | 429,71 | 429,71 | 429,71 | 429,71 | 429,71 |

Po kietinimo AAB bandiniai buvo išimami iš formų, jei reikia, supjaustomi į prizmes ar kitos formos bandinius, ir kondicionuojami ventiliuojamoje džiovynkoje iki pastovios masės 105±5 °C temperatūroje.

## 2.3. Tyrimų metodai

### 2.3.1. Autoklavinio akytojo betono formavimo mišinių tyrimų metodai

**Sklidumas.** Šiam tikslui buvo naudotas „Suttardo“ viskozimetras. Maišyklėje sumaišyto AAB formavimo mišiniu buvo užpildomas viskozimetras (kiauras cilindras), pastatytas ant švaraus stiklinio paviršiaus. Paskui cilindras buvo pakeičiamas, ir ant stiklo paviršiaus išsiliejęs mišinys suformavo tam tikro skersmens paplotėlį. Pagal paplotėlio skersmenį buvo sprendžiama apie mišinio sklidumą. Matavimai buvo atlikti linuote 1 mm tikslumu (Martinenko, Morozova 2009).

**Didžiausioji temperatūra.** Sumaišius AAB komponentus gauti formavimo mišiniai, kurie buvo supilti į formas, ir fiksuojamas laikas bei pradinė mišinio temperatūra. Laikas buvo matuojamas mechaniniu sekundmačiu 1 s tikslumu, temperatūra – 1 °C tikslumu (Martinenko, Morozova 2009). Termometro rodmenys buvo fiksuojami kas 1 min. Matavimas buvo atliekamas tol, kol buvo pasiekta didžiausioji formavimo mišinio temperatūra.

**Išsipūtimo aukštis.** Formavimo mišinio išsipūtimo aukštis formoje buvo matuojamas metaline liniuote 1 mm tikslumu ir užrašomas kas 1 min.

**Plastiškasis stipris.** Formavimo mišinių plastiškasis stipris buvo nustatytas naudojant „Rebinderio“ plastometrą, kurio smaigalio kampas – 45°. Tam tikrais laiko intervalais 1 mm tikslumu buvo nustatomas plastometro įsmigimo į formavimo mišinį gylis ir pagal metodiniuose nurodymuose (Martinenko, Morozova 2009) pateiktą formulę buvo apskaičiuotas plastiškasis stipris:

$$P_{pl} = k_{\alpha} \cdot \frac{F}{h^2}, \text{ g/cm}^2, \quad (2.1)$$

čia  $P$  – plastiškasis stipris, g/cm<sup>2</sup>;  $F$  – kūgio svoris, g;  $h$  – kūgio įsmigimo gylis (vertikaliai), cm;  $k_{\alpha}$  – konstanta, priklausanti nuo kūgio kampo ir pagrindo, prie skirtingų kampų: 45° – 0,416; 60° – 0,217.

**Formavimo mišinio ultragarso impulso sklidimo greitis.** AAB formavimo mišinio ultragarso impulso sklidimo greitis (UIG) buvo nustatytas „Pundit 7“ prietaisu (2.7 pav.) pagal LST EN 12504-4 „Betono bandymas. 4 dalis. Ultragarso greičio impulso nustatymas“ standartą.



2.7. pav. Formavimo mišinių UIG matavimo prietaisas „Pundit 7“

Fig. 2.7. Ultrasonic impulse velocity (UIV) measuring device “Pundit 7” for forming mixtures

UIG pradėtas fiksuoti po 20 min, nuo formavimo mišinio supylimo į prietaisą, kai mišinys visiškai išsipūtė.

### 2.3.2. Sukietinto autoklavinio akytojo betono tyrimų metodai

**Bandinių kondicionavimas.** AAB buvo laikomi ne aukštesnėje kaip 60 °C temperatūroje, kol jų tikėtinas absoliutusias drėgnis sudarė  $6 \pm 2$  % masės. Pasiekus nustatytą drėgnį, bandiniai mažiausiai 2 h buvo laikomi tokiomis sąlygomis, kad jų drėgnis negalėtų keistis, o AAB temperatūra susilygintų su bandymų laboratorijos temperatūra  $20 \pm 5$  °C. Prieš pat bandymą su „Axis AG 4000C“ elektroninėmis svarstyklėmis buvo nustatyta AAB masė 0,01 g tikslumu.

**Makrostruktūra.** AAB makrostruktūros tyrimai atlikti optiniu mikroskopu „Motic“ (didinimas iki 100 kartų) (2.8 pav.), charakteringos zonos fotografuotos skaitmenine kamera „Pixera PVC 100C“, sujungta su kompiuteriu.



2.8 pav. Optinis mikroskopas „Motic“  
Fig. 2.8. “Motic” optical microscope

Makrostruktūros tyrimai buvo atliekami AAB skerspjūvyje. Suformuoti bandiniai buvo perpjauti, nušlifuoti ir nufotografuoti optiniu mikroskopu padidinus juos 12 kartų. Vienodo ploto bandinių nuotraukos buvo ištirtos „UTHSCSA Image Tool“ ir „Pixcavator Image Analysis“ programomis. Buvo nustatytas AAB nagrinėjamame skerspjūvyje porų skaičius, perimetras, plotas ir apvalumas, kai apvali pora lygi 100 %.

**Mikrostruktūra.** AAB matricos sąlyčio zona su naudojamais priedais ir C-S-H silikatų struktūra tirta skenuojančiu elektroniniu mikroskopu „JEOL JSM-

7600F“ (2.9 pav.), kurio skiriamoji geba – 1,5 nm. Prieš tyrimą paviršiai buvo padengti vakuume aukso arba anglies sluoksniu, prietaiso spartinančioji įtampa – 20 kV.



**2.9 pav.** Skenuojantis elektroninis mikroskopas „JEOL JSM-7600F“

**Fig. 2.9.** Scanning electron microscope “JEOL JSM-7600F”

AAB esančių mikroporų skersmuo, tūris ir plotas nustatyti gyvsidabrinio porozimetru „PoreMaster 33“ (2.10 pav.).



**2.10 pav.** Porozimetras „PoreMaster 33“

**Fig. 2.10.** Porozimeter “PoreMaster 33”

**Rentgenografiniai tyrimai.** Junginiai, susidarę kietėjant AAB medžiagos matricai, nustatyti rentgenografiškai ištyrus mechaniškai susmulkintas iki 10  $\mu\text{m}$  dydžio jos daleles. Šie tyrimai atlikti rentgeno difraktometru „DRON-7“. Techninės prietaiso charakteristikos: katodas – varis, filtras – nikelis, anodo įtampa – 30 kV, anodo srovė – 8 mA, goniometro plyšeliai 0,5 mm, 1,0 mm, 0,5 mm fazinė sudėtis identifikuota remiantis etaloninių duomenų ASTM kartoteka. Buvo nustatyta, kokie junginiai susidaro AAB su 1,0 % AS ir 0,1 % AP ir be priedų.

**Termografiniai tyrimai.** Diferencinė termografinė analizė buvo atlikta derivatografu „Linseis STA PT-1600“, aplinka – oras, temperatūra – iki 1100 °C, temperatūros kėlimo sparta – 10 °C/min. Buvo atlikti AAB be priedų bei AAB su 1,0 % AS ir 0,1 % AP termografiniai tyrimai.

**Tankis.** AAB tankis buvo nustatytas pagal LST EN 678 „Autoklavinio akytojo betono tankio nustatymas“. Tankis buvo nustatomas apskaičiuojant iki pastovios masės 105±5 °C temperatūroje išdžiovintų bandinių masės ir jų tūrio santykį. Visų sudėčių bandinių skaičius – po penkis 100×100×100 mm kubelius. AAB matmenys buvo nustatyti 0,1 mm tikslumu naudojant slankmatį, masė – 0,01 g tikslumu, naudojant „Axis AG 4000C“ elektronines svarstykles.

Sukietėjusio AAB tankis apskaičiuotas pagal formulę:

$$\rho_{AAC} = \frac{m}{V} \cdot 10^6, \text{ kg/m}^3, \quad (2.2)$$

čia  $m$  – išdžiovinto AAB masė, kg;  $V$  – AAB tūris, m<sup>3</sup>.

**Ultragarso impulso sklaidimo greitis.** Ultragarso impulso sklaidimo greitis (UIG) nustatyti buvo naudojami 70×70×70 mm AAB bandiniai. UIG matavimo prietaisais pateiktas 2.11 paveiksle. Prietaisu „UK-14P“ dviem statmenomis AAB paviršių plokštumomis viena kitai kryptimis buvo leidžiamas ultragarso signalas ir išmatuotas UIG. Ultragarso signalas buvo leidžiamas statmenai ir išilgai AAB pūtimosi kryptčiai orientuotųjų plokštumų paviršiais.



2.11. pav. UIG matavimo prietaisas „UK-14P“

Fig. 2.11. UIV measuring device “UK-14P”

UIG buvo skaičiuojamas pagal metodiniuose nurodymuose LST 1428-10 „Betonas. Bandymų metodai. Neardomieji bandymai. Ultragarso greičio impulso nustatymas“ pateiktą formulę:

$$V_{UG} = \frac{l}{\tau \cdot 10^{-6}}, \text{ m/s}, \quad (2.3)$$

čia  $l$  – AAB bandinio ilgis, m;  $\tau$  – signalo sklaidimo laikas, s;  $10^{-6}$  – konvercijos koeficientas.

**Gniuždymo stipris.** AAB gniuždymo stipris nustatyta pagal LST EN 679 „Autoklavinio aktybetonio gniuždomojo stiprio nustatymas“. Bandyta po penkis  $100 \times 100 \times 100$  mm dydžio AAB bandinius. Įrenginio pastūmos mechanizmo greitis bandymo metu – 10 mm/min. AAB gniuždymo stipris nustatytas naudojant kompiuterizuotą įrangą „Haunsfield-H10KS“ ir programą „Qmat Professional“ (2.12 pav.).



2.12. pav. Kompiuterizuota įranga „Haunsfield-H10KS“ AAB gniuždymo stipriui nustatyti

Fig. 2.12. Computerized equipment „Haunsfield-H10KS“ to determine the compressive strength of AAB

**Lenkimo stipris.** AAB lenkimo stipris nustatytas pagal LST EN 1351 „Autoklavinio aktytojo betono stiprio lenkiant nustatymas“. Bandyta po šešis  $160 \times 40 \times 40$  mm dydžio AAB bandinius. Įrenginio pastūmos mechanizmo greitis bandymo metu – 10 mm/min.

Faktinio tankio AAB gniuždymo ir lenkimo stipriai buvo perskaičiuoti, pasirinkus reikiamą tankį, pagal formulę:

$$\sigma_{pr} = \frac{\sigma_f \cdot \rho_{pr}^2}{\rho_f^2}, \frac{N}{mm^2}, (MPa), \quad (2.4)$$

čia  $\sigma_{pr}$  – pasirinkto tankio AAB stipris,  $\text{N/mm}^2$ , (MPa);  $\sigma_f$  – faktinio tankio AAB stipris,  $\text{N/mm}^2$ , (MPa);  $\rho_{pr}$  – pasirinktas AAB tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_f$  – faktinis AAB tankis,  $\text{kg/m}^3$ .

**Eksperimentinių duomenų statistinis apdorojimas.** Nustatant AAB bandinių su skirtingais priedais ir skirtingais jų kiekiais bandinio fizikinės mechaninės savybės matoma eksperimentinių gniuždymo ir lenkimo duomenų sklaida. Todėl šiame darbe buvo taikyti eksperimentinių duomenų statistinio apdorojimo metodai. Šie metodai leidžia patikimai nustatyti AAB su skirtingais priedais ir jų kiekiais gniuždymo ir lenkimo stiprių rezultatus, naudojant pasikliautinumo intervalą, leidžia įvertinti sklaidos ribas ir nustatyti AAB savybių atskirų rodiklių tarpusavio empirinės priklausomybės parametrus.

Matematinis-statistinis eksperimentinių duomenų įvertinimas atliktas esant pasikliautinumo lygmeniui 95 % nustatant pasikliautinumo intervalus pagal (Faiz *et al.* 2007; Reis, Ferreira 2006; Han *et al.* 2005) metodus, nustatant empirines priklausomybes.

Skaitmeninės regresijos koeficientų reikšmės nustatytos mažiausiųjų kvadratų metodu (Lau, Anson 2006).

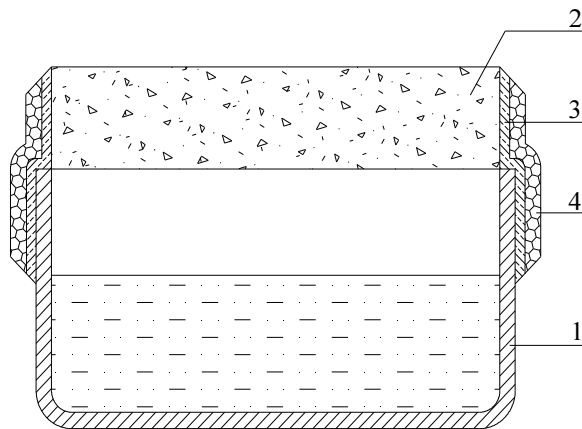
**Terminė susitrauktis.** AAB terminė susitrauktis buvo nustatyta šiluminių deformacijų nustatymo metodu. Bandymas atliktas „LINSEIS L76“ prietaisu (2.13 pav.).



2.13 pav. Dilatometras „LINSEIS L76“  
Fig. 2.13. Dilatometer “LINSEIS L76”

Temperatūra buvo keliama iki  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $5,0\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  greičiu, išlaikymo trukmė – 300 min, AAB skersmuo – 5,0 mm, ilgis – 50,0 mm.

**Laidumas vandens garams.** AAB laidumo vandens garams savybės nustatytos reguliuojamo temperatūrinio režimo kameroje pagal LST EN 772-15 „Mūro gaminių bandymo metodai. 15 dalis. Autoklavinio akytojo betono mūro gaminių vandens garų pralaidumo nustatymas“ metodą.



**2.14 pav.** AAB paruošimo garų laidumo eksperimentui schema:

1 – vandeninis druskos tirpalas; 2 – AAB bandinys; 3 – sandarinimo medžiaga; 4 – sutvirtinimo juosta

**Fig. 2.14.** Preparation of AAB for experiment of water vapour permeability: 1 – desiccant/aqueous saturated salt solution; 2 – test specimen; 3 – sealant; 4 – tape

Induose naudotas  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  druskos vandeninis tirpalas, užtikrinantis 52 % santykinę drėgnį, o kameroje –  $\text{KNO}_3$ , užtikrinantis 94,0 % santykinę drėgnį. Bandyta po penkis  $100 \times 100 \times 50$  mm dydžio AAB bandinius. AAB paruošimo schema pateikta 2.14 paveiksle.

**Šilumos laidumo koeficientas.** Kiekvienos medžiagos šilumos perdavimo intensyvumas apibūdinamas šilumos srauto tankiu. Šilumos srautas yra proporcingas temperatūros gradientui ir nukreiptas temperatūros mažėjimo kryptimi. Temperatūros gradientas rodo, koks temperatūros pokytis atitinka ilgio vienetą. Mažesnis temperatūros gradientas rodo didesnę temperatūrų skirtumą esant tam pačiam atstumui, taigi ir greitesnį šilumos perdavimą.

Žinant medžiagos, per kurią perduodama šiluma, storį  $d$ , m, temperatūrų pokytį tarp šiltojo ir šaltojo medžiagos paviršių  $\Delta T = T_1 - T_2$ , K, šilumos srauto tankį  $\rho$ ,  $\text{W}/\text{m}^2$ , medžiagos šilumos laidumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\lambda = \frac{\rho \cdot d}{\Delta T}, \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}). \quad (2.5)$$

Medžiagų šilumos laidumo tyrimai buvo atlikti taikant LST EN 1745 „Mūras ir jo gaminiai. Šiluminių savybių nustatymo metodai“ nurodytus metodus.

Bandymams naudotas kompiuterizuotas šilumos laidumo koeficiento nustatymo įrenginys „ $\lambda$ -Meter EP 500“ (2.15 pav.). Įrenginio matavimo ribos nuo  $0,005 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  iki  $0,500 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , matavimų tikslumas – 1 %. Temperatūrų perkrytis tarp matavimo plokščių –  $10^\circ\text{C}$ . Šilumos laidumo koeficientas buvo nustatomas tolygaus vienkrypio šiluminio srauto matavimo tarp dviejų plokščių

būdu, vidutinėje 10 °C temperatūroje. Viršutinę įrenginio plokštę galima pakelti arba nuleisti – t. y. jos padėtį galima keisti vertikaliai AAB paviršiui ir kartu lygiagrečiai su šilumos srauto kryptimi. Viršutine įrenginio plokšte bandiniai buvo apspausiti naudojant nuo 50 Pa iki 2 500 Pa apkrovą. Bandant AAB buvo naudota 1000 Pa apkrova.



**2.15 pav.** Kompiuterizuota įranga „λ-Meter EP 500“ AAB šilumos laidumo koeficientui nustatyti

**Fig. 2.15.** Computerized equipment „λ-Meter EP 500“ for determination of thermal conductivity coefficient of AAB

Bandymams paruošti AAB bandiniai, kurių matmenys 300×300×50 mm. Prietaiso aktyvus matuojamasis plotas – 250×250 mm<sup>2</sup>. Toks matuojamo ploto dydis yra pakankamas, siekiant išvengti medžiagos nevienalytiškumo poveikio bandymų rezultatams.

**Atsparumas šalčiui.** Bandymas atliktas pagal LST EN 15304 „Autoklavinio akytojo betono atsparumo šalčiui nustatymas“. Paruoštų bandinių skaičius – 12 vnt. 6 bandiniai buvo šaldomi ir atšildomi, o kiti 6 – kontroliniai, rezultatų palyginimui. Bandiniai – kubai 100×100×100 mm išpjauti iš AAB prizmių. Pagrindiniai bandiniai įmirkyti vandenyje 48 val., 24 val. laikyti polietileno maišuose ir paskui pradėti šaldyti 35 ciklus pagal LST EN 15304 reikalavimus. Kontroliniai bandiniai taip pat įmirkyti vandenyje 48 val., 24 val. laikyti polietileno maišuose, tada perkelti į klimatinę kamerą, kad neišdžiūtų. Pagrindiniai bandiniai prieš šaldymo bandymą buvo apžiūrėti, kad nebūtų matomų defektų bandinių paviršiuje.

Pagrindiniai ir kontroliniai bandiniai po 35 šaldymo ir atšildymo ciklų buvo išdžiovinti iki pastovios masės 105±5 °C temperatūroje ir nustatytas jų masės ir gniuždymo stiprio sumažėjimas.

## 2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Unikalia mokslinė įranga nustatytas žaliavų dalelių pasiskirstymas:
  - nustatyta, kad maltą kvarcinį smėlį sudaro nuo 4  $\mu\text{m}$  iki 200  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės, dominuoja (70 % visų dalelių) 80–90  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės;
  - nustatyta, kad pagrindinę dalį (~80 % visų dalelių) – AS priedą – sudaro 20–30  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės, o AP priedą – 8–9  $\mu\text{m}$  dydžio dalelės.
2. Tyrimų metuose aprašytas priedų paruošimo būdas ir jų formavimo maišymo režimai užtikrino tolygų silicio dioksido mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedų bei Al pastos dalelių pasiskirstymą akytojo betono bandiniuose.

---

## **Silicio dioksido mikrodulkių ir malto anglies pluošto priedų poveikis autoklavinio akytojo betono formavimo mišinių ir bandinių savybėms**

Šiame skyriuje aprašomas silicio dioksido mikrodulkių (AS) ir malto anglies pluošto (AP) priedų poveikis autoklavinio akytojo betono (AAB) formavimo mišinių ir bandinių savybėms. Šio skyriaus medžiaga paskelbta keturiuose straipsniuose (Balčiūnas *et al.* 2011; Laukaitis *et al.* 2011, 2012; Lekūnaitė *et al.* 2012) ir pristatyta šešiose mokslinėse konferencijose.

### **3.1. Autoklavinio akytojo betono su priedais formavimo mišinių savybės**

Šiame skyriuje tirtas AS ir AP priedų ir jų kiekio poveikis AAB formavimo mišinių savybėms. Nustatyta, kaip priedai veikia AAB formavimo mišinių sklidu-

mą, didžiausiąją temperatūrą, išspūtimo aukštį, plastiškąjį stiprį ir ultragarso impulso sklaidymo greitį (UIG).

### 3.1.1. Priedų ir aliuminio pastos pasiskirstymas autoklavinio akytojo betono formavimo mišinyje

Į AAB formavimo mišinį pridėjus AS ar AP priedo, reikia, kad jis gerai pasiskirstytų. Jei priedas yra labai smulkus, tad jis gali sulipti. Neišskaidžius šio priedo į atskiras mažas daleles ir maišant formavimo mišinį, jos neatsiskiria ir susidaro priedo sankaupos, kurios gali pabloginti AAB formavimo mišinių ir bandinių savybes. Kadangi šiame darbe visi naudoti priedai yra labai smulkūs, tai prieš maišant būtina juos išskaidyti į atskiras smulkias daleles, t. y. išskaidyti ultragarsiniu smulkių dalelių sklaidikliu. AS bei AP priedai buvo išskaidomi su dalimi (10 %) naudojamo vandens ir 0,03 % PAM (skaičiuojant pagal Al pastos masę), po 3 min išskaidymo sulipusios dalelės visiškai išsiskaidė. PAM buvo naudojamas, kad esančios smulkios dalelės gerai susivilgytų ir apkibtų rišamąją medžiagą. Daugumoje nagrinėtų šaltinių (Laukaitis 2000; Mikulsikis 2007) priedai buvo maišomi su smėlio šlamu, bet tokiu atveju gali būti pakeistas ar netgi suardytas priedo paviršius. Tai gali keisti AAB formavimo mišinių ir bandinių savybes. Kad nepakistų priedo paviršius, priedas į formavimo mišinį buvo supiltas paskutinę minutę. Taip pat buvo išskaidoma ir Al pasta, kad jos dalelės nesukibtų ir AAB formavimo mišinio pūtimosi metu nesusidarytų didelių porų, kurios gali gerokai pakeisti formavimo mišinių ir betonų savybes. Al pastos dalelės buvo išskaidomos su dalimi naudojamo vandens. AAB komponentų sumaišymo eiliškumas ir trukmė pateikti 3.1 lentelėje.

**3.1 lentelė.** AAB komponentų sumaišymo eiliškumas ir maišymo trukmė

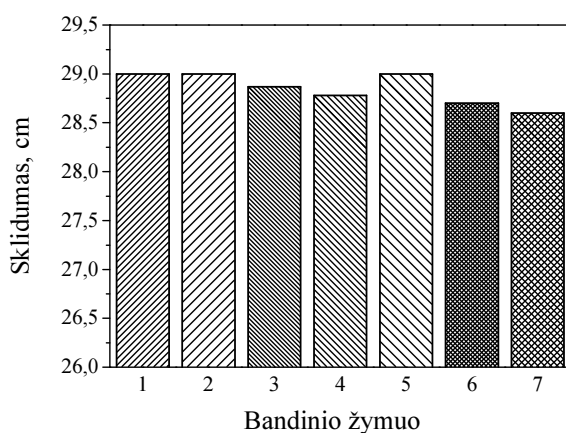
**Table 3.1.** Sequence and duration of mixing of AAB components

| Komponentai                                                                                                       | Maišymo trukmė, min |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Vanduo + smėlis                                                                                                   | 5,0                 |
| Vanduo + smėlis + portlandcementis                                                                                | 1,0                 |
| Vanduo + smėlis + portlandcementis + kalkės                                                                       | 1,0                 |
| Vanduo + smėlis + portlandcementis + kalkės + Al pasta (išskaidyta)                                               | 1,0                 |
| Vanduo + smėlis + portlandcementis + kalkės + Al pasta (išskaidyta) + AS arba CF (išskaidyti ir sumaišyti su PAM) | 1,0                 |
| Iš viso                                                                                                           | 9,0                 |

Taip sumaišius AAB komponentus gauta homogeniška AAB bandinių struktūra, kurią įrodo 3.2.1 ir 3.2.2 skyreliuose pateikti paveikslai.

### 3.1.2. Sklidumas

Atlikus AAB formavimo mišinių sklidumo tyrimus, nustatyta, kad AAB be priedų mišinių sklidumas lygus 290 mm. AAB formavimo mišinio sklidumą galima reguliuoti keičiant V/K santykį. Šiuo atveju buvo pasirinktas  $V/K = 0,54$ . Sklidumo nustatymas yra svarbus AAB formavimui. Esant pakankamam AAB mišinio sklidumui, formavimo mišinys gerai pasiskirsto formoje ir lengviau susidaro mišinio poringumas. Darbe nustatytas AAB formavimo mišinio sklidumas yra pakankamas, kad įgautų minėtas savybes. Jei mišinio sklidumas bus labai didelis, keisis AAB tankis. Į AAB formavimo mišinį pridėjus AS arba AP priedo, jo sklidumas mažėjo atitinkamai didinant priedų kiekius. Priedų poveikis AAB formavimo mišinio sklidumui pasireiškia skirtingai. Didinant AS priedo kiekį nuo 0,5 % iki 1,5 %, formavimo mišinio paplotėlio skersmuo keitėsi labai nežymiai, jis sumažėjo 0,8 % (3.1 pav., 2–4), o naudojant AP priedą (nuo 0,05 % iki 0,2 %) skersmuo sumažėjo 1,4 % (3.1 pav., 5–7).



**3.1 pav.** AAB formavimo mišinio sklidumas, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 0,5 AS; 3 – 1,0 AS; 4 – 1,5 AS; 5 – 0,05 AP; 6 – 0,1 AP; 7 – 0,2 AP

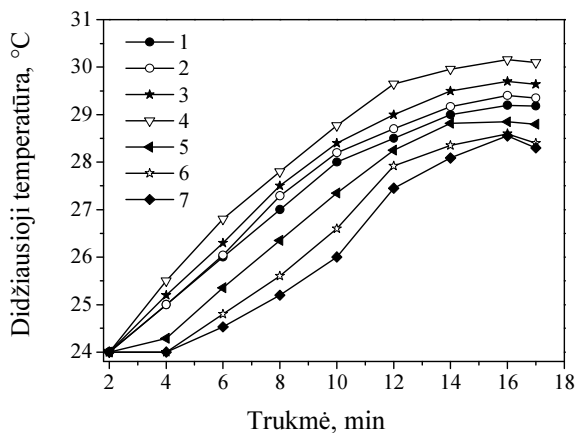
**Fig. 3.1.** Spreadability of AAB forming mixture at the following content of additive by %: 1 – 0; 2 – 0.5 AS; 3 – 1.0 AS; 4 – 1.5 AS; 5 – 0.05 AP; 6 – 0.1 AP; 7 – 0.2 AP

AAB formavimo mišinio sklidumo pokyčius lemia AS bei AP dalelių dydis. Kuo naudojamų priedų dalelės yra mažesnės, t. y. jų savitasis paviršius – didesnis, tuo AAB formavimo mišinio sklidumas mažesnis. Kadangi darbe buvo nau-

doti nedideli priedų kiekiai, jie nedaug veikė AAB formavimo mišinio sklidumą. Norint naudoti didesnius AS ir AP priedų kiekius, reikėtų didinti V/K santykį, kad gerai susivilgytų smulkių priedų dalelės ir būtų pakankamas sklidumas geram AAB formavimui.

### 3.1.3. Didžiausioji temperatūra

Hidratuojantis rišamosioms medžiagoms, didžiausioji AAB formavimo mišinio temperatūra priklauso nuo rišamosios medžiagos sudėties. Šiuo atveju buvo naudojamos kalkės ir cementas. AS ir AP priedai skirtingai veikė formavimo mišinio didžiausiąją temperatūrą, lyginant su AAB formavimo mišinių be minėtų priedų. Nustatyta, kad AAB formavimo mišinių be priedų aukščiausia temperatūra buvo 29 °C, ji pasiekta per 16 min (3.2 pav., 1 kreivė). Lyginant abu priedus AS ir AP, jie AAB formavimo mišinį veikia skirtingai. AS didina didžiausiąją mišinio temperatūrą, o AP – mažina. Į AAB formavimo mišinį, pridėjus nuo 0,5 % iki 1,5 % AS priedo, mišinio didžiausiosios temperatūros prieaugis nuo 0,68 % iki 3,28 %, lyginant su AAB be minėtų priedų (3.2 pav., 2–4 kreivės). Tai rodo, kad AS priedas spartina formavimo mišinyje vykstančias hidratacijos reakcijas.



**3.2 pav.** AAB formavimo mišinio didžiausiosios temperatūros kaita, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 0,5 AS; 3 – 1,0 AS; 4 – 1,5 AS; 5 – 0,05 AP; 6 – 0,1 AP; 7 – 0,2 AP

**Fig. 3.2.** The change of maximal temperature of AAB forming mixture at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 0.5 AS; 3 – 1.0 AS; 4 – 1.5 AS; 5 – 0.05 AP; 6 – 0.1 AP; 7 – 0.2 AP

Pridėjus AP į AAB formavimo mišinį matoma, kad didžiausioji temperatūra ėmė mažėti. Didinant šio priedo kiekį (šiuo atveju didžiausias kiekis 0,2 %), didžiausiosios temperatūros nuosmukį sudarė 2,2 % (3.2 pav., 7 kreivė), lyginant su AAB be minėto priedo (3.2 pav., 1 kreivė). Tai rodo, kad AP didesnis priedo kiekis stabdo mišinyje vykstantį struktūros susiformavimą, nes jis nereaguoja su rišamąja medžiaga ir yra labai smulkus.

Remiantis AAB formavimo mišinio su AS ir AP priedais ir skirtingais jų kiekiais tyrimais, nustatyta, kad geriausias AS priedo kiekis – 1,0 %. Nors mišinio su 1,0 % priedu (3.2 pav., 3 kreivė) aukščiausia didžiausioji temperatūra buvo mažesnė nei su 1,5 % minėtu priedu (3.2 pav., 4 kreivė), bet su 1,0 % ji kilo tolygiau. Netolygus temperatūros kilimas gali suardyti struktūrą. (Laukaitis 2000) teigia, kad stipriai didėjant formavimo mišinio didžiausiajai temperatūrai struktūroje vyrauja netaisyklingos formos susisiekančios poros.

Ankstesniuose darbuose jau buvo nustatyta, kad AP priedas sumažina didžiausiąją formavimo mišinio temperatūrą dėl padidėjusio V/K santykio (Laukaitis 2000). Šiame darbe teigiama, kad didžiausioji temperatūra kiek sumažėja dėl AP priedo kiekio. Kadangi AP priedas mažina AAB formavimo mišinio didžiausiąją temperatūrą, todėl geriausias šio priedo kiekis turėtų būti kiek įmanoma mažesnis.

### 3.1.4. Išsipūtimo aukštis

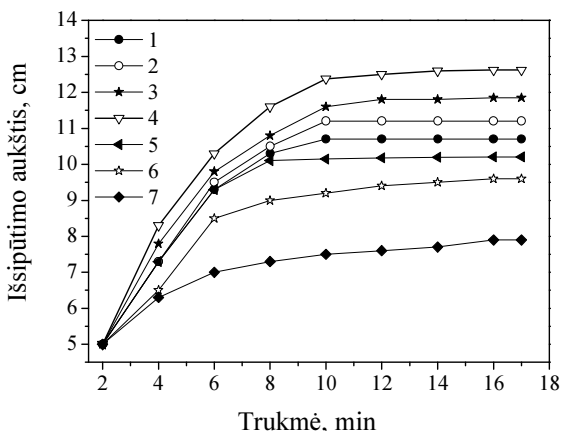
Po AAB formavimo mišinio, su AS arba AP priedais ir be jų, komponentų sumaišymo, gautas formavimo mišinys buvo pilamas į formas, kuriose supilto ir dar nepradėjusio pūstis mišinio aukštis siekė 5 cm, t. y. pusę formos aukščio. Nuo minėto aukščio buvo fiksuojami tolimesni formavimo mišinių pūtimosi parametrai. Visų formavimo mišinių didžiausias išsipūtimo aukštis buvo pasiektas per 16 min (3.3 pav.).

Gauti tyrimo rezultatai parodė, kad AS didina ne tik formavimo mišinio didžiausiąją temperatūrą (3.2 pav., 2–4 kreivės), bet ir išsipūtimo aukštį (3.3 pav., 2–4 kreivės). Į formavimo mišinius pridėjus AP priedo, dėl sumažėjusio sklidimo ir didžiausiosios temperatūros AAB formavimo mišinio išsipūtimo aukštis taip pat sumažėjo (3.2 pav., 5–7 kreivės).

Į AAB formavimo mišinį pridėjus 1,0 % AS, mišinio išsipūtimo aukštis padidėjo 11,0 %, o pridėjus 1,5 % AS – padidėjo 17,9 % (3.3 pav., 3 ir 4 kreivės), lyginant su AAB be priedo (3.3 pav., 1 kreivė).

Palyginus, kaip AP priedas veikia AAB formavimo mišinio išsipūtimo aukštį, įžvelgiamas tas pats poveikis kaip ir temperatūrų kaitos atveju. AP priedas mažina AAB formavimo mišinio išsipūtimą. Kuo didesnis AP kiekis, įdėtas į AAB formavimo mišinį, tuo mišinys mažiau išsipučia. Geriausias AP priedo kiekis – 0,05 %, pridėjus šį kiekį mišinio išsipūtimo aukštis kinta labai nedaug –

sumažėjo iki 4,6 % (3.3 pav., 5 kreivė), o dedant didesnę kiekį (0,2 %) mišinio, išsipūtimo aukščio sumažėjo iki 26,1 % (3.3 pav., 7 kreivė), lyginant su AAB be minėto priedo.



**3.3 pav.** AAB formavimo mišinio išsipūtimo aukščio kaita, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 0,5 AS; 3 – 1,0 AS; 4 – 1,5 AS; 5 – 0,05 AP; 6 – 0,1 AP; 7 – 0,2 AP

**Fig. 3.3.** The change of expansion of AAB forming mixture at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 0.5 AS; 3 – 1.0 AS; 4 – 1.5 AS; 5 – 0.05 AP; 6 – 0.1 AP; 7 – 0.2 AP

Pagal AS priedo poveikį mišinio išsipūtimo aukščiui galima teigti, kad pagal šį parametą geriausias AS priedo kiekis būtų 1,0 % (3.3 pav., 3 kreivė). Nors didžiausias formavimo mišinio išsipūtimas buvo su 1,5 % AS priedu (3.3 pav., 4 kreivė), toks gana didelis išsipūtimas sudarytų dideles poras, kurios gali labai sumažinti AAB stiprį. AP priedas nedaug mažina AAB formavimo mišinio išsipūtimo aukštį. Formavimo mišinių išsipūtimo aukštis priklauso nuo AP kiekio – kuo jo daugiau, tuo AAB formavimo mišinys mažiau išsipučia, todėl naudojant AP reikia arba didinti vandens ir kietųjų medžiagų (V/K) santykį, arba pasirinkti kiek įmanoma mažesnę minėto priedo kiekį.

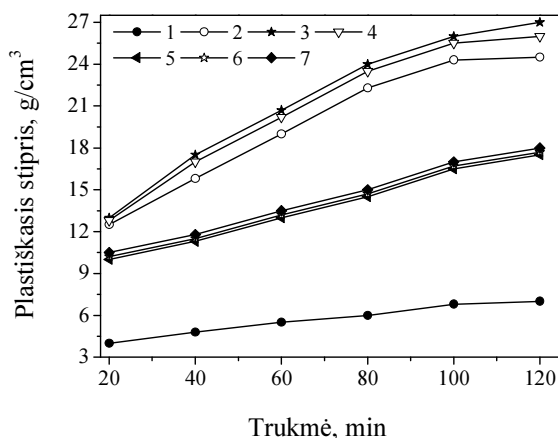
### 3.1.5. Plastiškasis stipris

Gaminant AAB yra labai svarbu, kad, baigus hidratuotis rišamajai medžiagai, formavimo mišinio plastiškasis stipris būtų pakankamas technologinėms operacijoms atlikti, t. y. nupjauti kaupą, supjaustyti luitą ir pradėti kietinimą autoklave. Reikiamą akytojo betono masės plastiškąjį stiprį greičiausiai galima pasiekti,

didinant kalkių kiekį mišrioje rišamojoje medžiagoje, pridėjus greičiau besigesinančių kalkių arba pridėjus priedų. Šiuo atveju buvo naudoti AS ir AP priedai.

Tyrimo rezultatai rodo, kad AS arba AP priedai skirtingai veikia AAB formavimo mišinių plastišką stiprį, ir jis yra didesnis nei AAB formavimo mišinių be priedų.

AS yra aktyvus priedas, intensyviai reaguojantis su rišamąja medžiaga ir sudarantis stipresnį ir tankesnį karkasą, tad jis suteikia formavimo mišiniui didesnį plastišką stiprį. Naudojant AS priedą AAB formavimo mišinio plastiškasis stipris didėjo iki tam tikros ribos. Dedant daugiau nei 1,0 % AS, plastiškasis stipris ėmė mažėti. Su 1,0 % AS plastiškasis stipris padidėjo 286 % (3.4 pav., 3 kreivė), o su 1,5 % – 271 % (3.4 pav., 4 kreivė), lyginant su AAB be priedo (3.4 pav., 1 kreivė). Dedant didesnę kiekį AS priedo susidaro daugiau susisiekiančių porų (3.6 pav., d), todėl plastiškasis stipris ėmė mažėti. Akivaizdu, kad ir pagal šį parametą geriausias AS priedo kiekis būtų 1,0 %.



3.4 pav. AAB formavimo mišinio plastiškojo stiprio kaita, kai priedo kiekis, %:  
1 – 0; 2 – 0,5 AS; 3 – 1,0 AS; 4 – 1,5 AS; 5 – 0,05 AP;  
6 – 0,1 AP; 7 – 0,2 AP

Fig. 3.4. The change of plasticity strength of AAB forming mixture at the following content of additive by %: 1 – 0; 2 – 0.5 AS; 3 – 1.0 AS; 4 – 1.5 AS; 5 – 0.05 AP; 6 – 0.1 AP; 7 – 0.2 AP

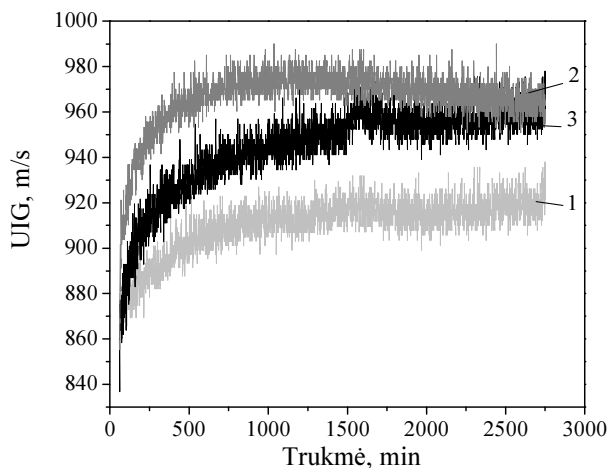
Naudojant priedą – AP plastiškasis stipris didėjo proporcingai AP kiekiui, pridėjus nuo 0,05 % iki 0,2 % plastiškasis stipris padidėjo nuo 150 % iki 157 % (3.4 pav., 5–7 kreivės). Plastiškojo stiprio rezultatai rodo, kad geriausias AP priedo kiekis būtų 0,2 % (3.4 pav., 7 kreivė), tačiau parenkant geriausią šio priedo kiekį būtina įvertinti, kad didesni AP kiekiai neigiamai veikia kitus technolo-

ginius parametrus: mažina mišinio sklidumą (3.1 pav., 7 kreivė), didžiausiąją temperatūrą (3.2 pav., 7 kreivė) ir išsipūtimo aukštį (3.3 pav., 7 kreivė).

Nustatyta, kad AS ir AP priedai atitinkamai padidina AAB formavimo mišinių plastiškąjį stiprį nuo 250 % iki 286 % (3.4 pav., 2 – 4 kreivės) ir nuo 150 % iki 157 % (3.4 pav., 5 – 7 kreivės), lyginant su AAB formavimo mišiniais be minėtų priedų. Plastiškojo stiprio padidėjimas pridėjus priedų, daro teigiamą poveikį AAB gamybos technologijai. Kuo greičiau AAB formavimo mišinys įgauna plastiškąjį stiprį, tuo labiau pagreitėja technologinis autoklavinio akytojo betono gamybos procesas.

### 3.1.6. Ultragarso impulso sklidimo greitis

AAB formavimo mišinių ultragarso impulso sklidimo greitis (UIG) buvo atliktas su 1,0 % AS, 0,1 % AP ir AAB be priedų. UIG buvo pradėtas matuoti visiškai išsipūtus formavimo mišiniui, t.y. po 20 min nuo mišinio supylimo į prietaisą. Naudojami priedai padidino UIG. Didžiausias UIG gautas naudojant AS priedą, su 1,0 % AS priedu UIG padidėjo 3 % (3.5 pav., 2 kreivė), o su 0,1 % AP priedu – 2 % (3.5 pav., 3 kreivė), lyginant su AAB be priedų (3.5 pav., 1 kreivė).



**3.5 pav.** AAB formavimo mišinių UIG, kai priedo kiekis, %: 1 – 0;  
2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.5.** UIV of AAB forming mixtures at the content of additive by %:  
1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

UIG pokyčiai atspindi AAB matricos struktūros formavimąsi, porų sienelių sutankėjimą ir naujų susidarymo spartą. Šių tyrimų rezultatai gerai koreliuo-

ja su plastiškojo stiprio tyrimų rezultatais. Pridėjus priedų gaunama tankesnė struktūra, taigi ir didesnis plastiškasis stipris bei UIG.

## 3.2. Sukietinto autoklavinio akytojo betono su priedais savybės

Šiame skyriuje tirta, kaip  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių (AS) ir malto anglies pluošto (AP) priedai veikia autoklavinio akytojo betono (AAB) mikro- ir makrostruktūrą, tankį, ultragarso impulso sklaidimo greitį (UIG), terminę susitrauktį, šilumos laidumą, laidumą vandens garams ir atsparumą šalčiui. Taip pat nustatyta, kaip naudojami priedai veikia AAB gniuždymo, lenkimo stiprius. Gauti stiprumo savybių rezultatai apdoroti statistiškai.

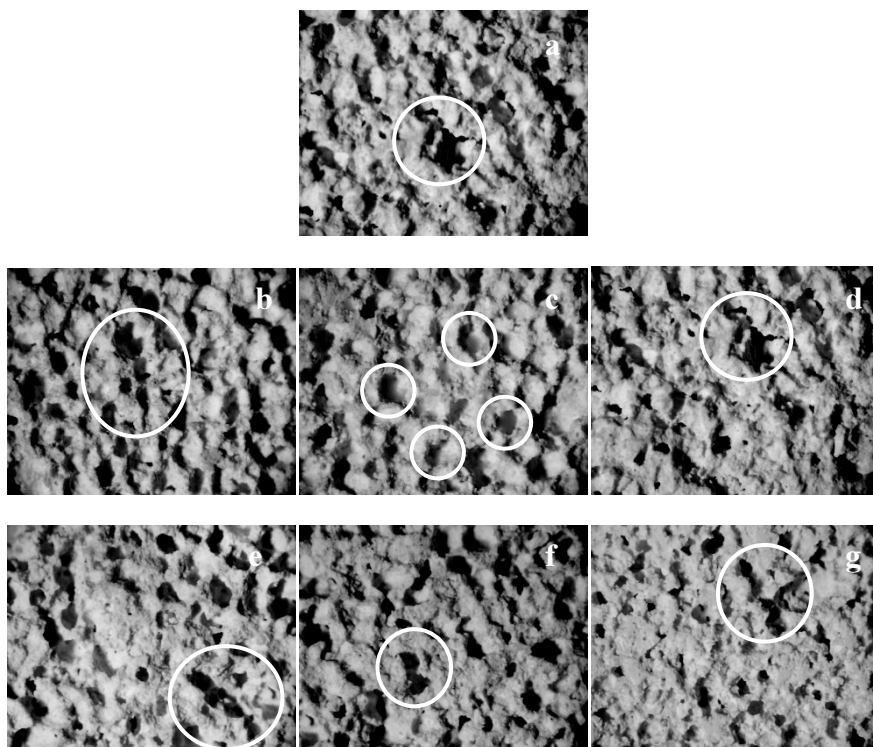
### 3.2.1. Makrostruktūra

Į AAB formavimo mišinį pridėjus iki 1,0 % AS priedo, padidėja mišinio didžiausioji temperatūra, išsipūtimo aukštis ir plastiškasis stipris, bet dedant šio priedo iki 1,5 %, AAB plastiškasis stipris ėmė mažėti, šių parametų pokyčiai neabejotinai turi poveikį ir sukietėjusio AAB struktūrai. Todėl buvo atlikti sukietėjusio betono makrostruktūros tyrimai (3.6 pav.).

Nagrinėjamas AAB su skirtingais priedais plotas – 50 mm<sup>2</sup>. Į AAB formavimo mišinį pridėjus iki 1,0 % AS susidarė vienodos, mažos, uždarnos poros (3.6 pav., c), o pridėjus 1,5 % šio priedo struktūra ėmė kisti, susidarė įvairaus dydžio susisiekiančios poros (3.6 pav., d). Daroma išvadą, kad dedant didesnę kiekį labai smulkaus (savitasis paviršius  $20 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) ir aktyvaus AS priedo ir nekeičiant V/K santykio, įvyko greitesnė reakcija, kuri didino formavimo mišinio temperatūrą, išsipūtimo aukštis ir taip susidarė makrostruktūra. Tai rodo formavimo mišinio didžiausiosios temperatūros (3.2 pav., 4 kreivė) ir išsipūtimo aukščio (3.3 pav., 4 kreivė) padidėjimas ir plastiškojo stiprio (3.4 pav., 4 kreivė) sumažėjimas.

Analogiškai kinta AAB struktūra panaudojus AP priedą, tačiau jo kiekis makrostruktūrai poveikio neturėjo, t.y. pridėjus 0,05 % ar 0,2 % struktūroje susidarė panašus porų kiekis. Į AAB formavimo mišinį pridėjus AP priedo, nepastebėta labai ryškių vizualiai matomų makrostruktūros pokyčių (3.6 pav., e, f, g), tačiau susidarė daugiau apvalesnių porų, nei bandiniuose be priedų.

Daroma išvada, kad naudojant priedus susidaro daugiau uždarų porų ir tolygesnė struktūra, kuri veiks AAB sukietėjusių bandinių šilumos laidumo, laidumo vandens garams savybes.



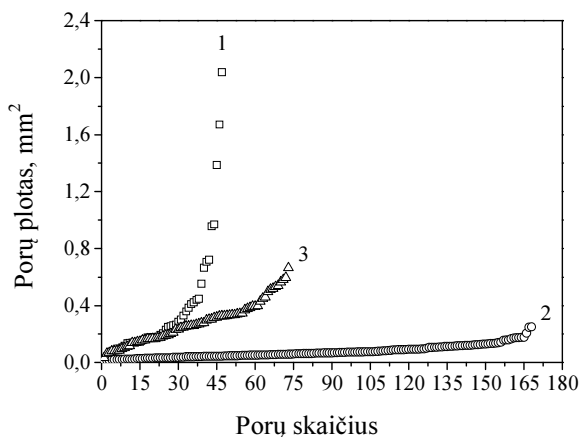
**3.6 pav.** AAB bandinių porų pasiskirstymas, kai priedo kiekis, %: a – 0; b – 0,5 AS; c – 1,0 AS; d – 1,5 AS; e – 0,05 AP; f – 0,1 AP; g – 0,2 AP. Didinimas  $\times 12$

**Fig. 3.6.** Pores distributed in AAB specimens at the content of additive by %: a – 0; b – 0.5 AS; c – 1.0 AS; d – 1.5 AS; e – 0.05 AP; f – 0.1 AP; g – 0.2 AP. Magnification  $\times 12$

Vizualiai įvertinus AS ir AP priedų poveikį AAB struktūrai buvo atlikti porų skaičiavimai ir jų plotų, perimetro bei apvalumo nustatymo tyrimai kompiuterinėmis „UTHSCSA Image Tool“ ir „Pixcavator Image Analysis“ programomis.

**Porų plotas autoklavinio akytojo betono bandinių skerspjūvyje.** AAB porų plotų tyrimas rodo, kokią dalį  $50 \text{ mm}^2$  bandinio plote užima tuštumos ir kokią matrica. Porų plotas nagrinėjamame AAB skerspjūvyje buvo skaičiuotas tik su geriausiais naudojamų priedų kiekiais, nes su šiais kiekiais buvo matomi ryškiausi struktūros pokyčiai. AAB porų plotų tyrimai parodo, kiek porų susidaro nagrinėjamame skerspjūvyje ir koks yra jų plotas. Nuo porų kiekio ir dydžio priklauso AAB struktūra. 3.7 paveiksle pateiktas taškinis grafikas, kuriame vienas taškas parodo vienos poros plotą.

AAB be priedų bandinyje (3.7 pav., 1 kreivė) dominuoja didesnio skersmens poros, o jų skaičius yra nedidelis ( $50 \text{ mm}^2$  yra  $\sim 45$  poros), bendras porų plotas yra  $\sim 20 \text{ mm}^2$ . Pridėjus 1,0 % AS priedo AAB bandinyje dominuoja smulkios poros (didžiausios poros plotas – iki  $0,2 \text{ mm}^2$ ), o jų skaičius padidėja apie keturis kartus (165 poros) (3.7 pav., 2 kreivė). Nors porų padaugėjo, bet bendras porų plotas sumažėja 35 %. AAB su AP priedu (3.7 pav., 3 kreivė) matoma, kad poros kiek susmulkėjo ( $50 \text{ mm}^2$  dominuoja 75 poros, jų plotas kito nuo 0,1 iki  $0,7 \text{ mm}^2$ ). Kaip ir AAB su AS priedu, taip ir su AP priedu daugėjant porų skaičiui porų plotas buvo 15 % mažesnis, lyginant su AAB be priedų.



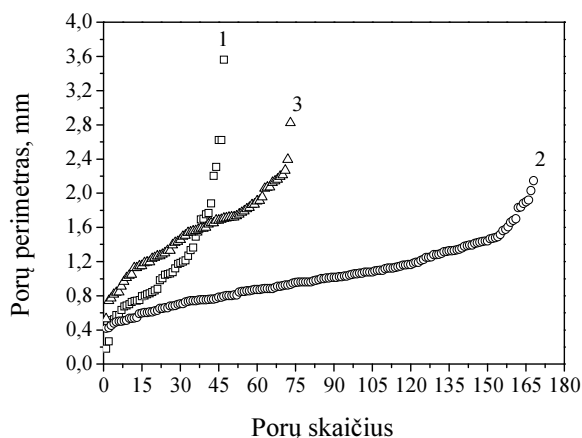
**3.7 pav.** Porų plotas ir jų skaičius AAB bandiniuose, kai priedo kiekis, %:

1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.7.** Area and quantity of pores in AAB specimens at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

Tyrimai rodo, kad abu priedai padidina AAB porų skaičių ir mažina porų plotą, todėl daroma išvada, kad naudojant priedus susidaro daug smulkių uždarytų porų. Šie rezultatai patvirtino vizualiai matomus makrostruktūros tyrimus. Nustatyta, kad esant labai smulkiam AS priedui ir nekeičiant V/K santykio, padidėjo AAB formavimo mišinio išsipūtimo aukštis ir didžiausioji temperatūra (3.3 ir 3.2 pav., 4 kreivė), todėl keičiasi AAB struktūra.

**Porų perimetras autoklavinio akytojo betono bandinių skerspjūvyje.** Pagal porų perimetro vertes galima spręsti apie susisiekančias poras. Jei vienodo skersmens dvi poros yra susisiekančios, tai jų perimetras bus mažesnis nei atskirų dviejų porų, o plotas bus panašus. 3.8 paveiksle pateiktas taškinis grafikas, kuriame vienas taškas rodo vienos poros perimetrą. Nustatyta, kad nagrinėjamame  $50 \text{ mm}^2$  AAB be priedų skerspjūvyje susidaro apie 45 poras, kurių bendras perimetras – 55 mm, o didžiausios poros perimetras lygus 3,6 mm.

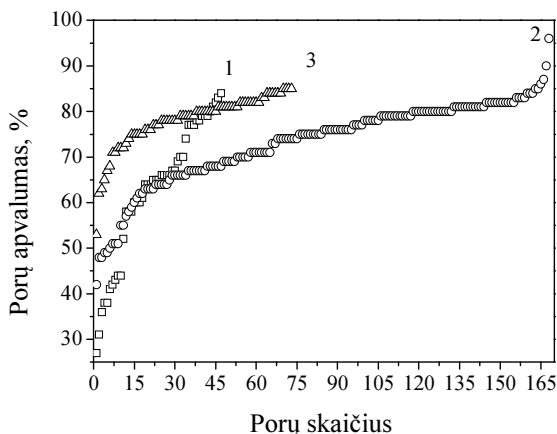


**3.8 pav.** Porų perimetras ir jų skaičius AAB bandiniuose, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.8.** Pore perimeter and quantity in AAB specimens at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

Atlikus porų perimetro skaičiavimus nagrinėjamame 50mm<sup>2</sup> AAB skerspjūvyje nustatyta, kad pridėjus 1,0 % AS priedo porų skaičius padidėja keturis kartus, o bendras porų perimetras – 171 % (3.8 pav., 2 kreivė), lyginant su AAB be minėto priedo (3.8 pav., 1 kreivė). Į AAB formavimo mišinį pridėjus 0,1 % AP, porų padaugėjo du kartus, o porų perimetras – 77 % (3.8 pav., 3 kreivė) lyginant su AAB be priedu. AAB formavimo mišiniuose panaudojus AS arba AP priedus susidarė daug mažų, apvalesnių, tolygiau pasiskirstančių porų, kurių skersmuo – nuo 1,0 mm iki 0,06 mm. Tai patvirtino „Porų plotas autoklavinio akytojo betono bandinių skerspjūvyje“ skyrelyje pateiktus rezultatus.

**Porų apvalumas autoklavinio akytojo betono bandinių skerspjūvyje.** Porų apvalumas kaip ir porų perimetras rodo, kiek AAB bandinyje yra susisiekančių porų. Jei poros susisiečia, tai jų apvalumas bus mažesnis, nei atskirų porų. Nagrinėjant AAB bandinių skerspjūvį visiškai apvalios formos poros apvalumas prilygintas 100 %. AAB be priedų vidutinis porų apvalumas buvo lygus 63 % (3.9 pav., 1 kreivė). Nustatyta, kad daugiausia apvalių porų gauta į AAB formavimo mišinį pridėjus 1,0 % AS, tuomet vidutinis porų apvalumas yra 60 % didesnis nei AAB be minėto priedo, o apvaliausios poros apvalumas siekia net 96 % (3.9 pav., 2 kreivė). AAB formavimo mišinyje naudojant 0,1 % AP, vidutinis porų apvalumas 38 % didesnis nei AAB be priedo, o apvaliausios poros apvalumas – 84 % (3.9 pav., 3 kreivė).



**3.9 pav.** Porų apvalumas % (kur apvali pora lygi 100 %) ir jų skaičius AAB bandiniuose, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.9.** Pore roundness % (where round pore equal to 100%) and quantity in AAB specimens at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

AAB su AP priedu, makrostruktūra kito ne taip daug kaip su AS priedu. Naudojant AP priedą susidarė daugiau smulkesnių ir mažiau susisiekiančių porų.

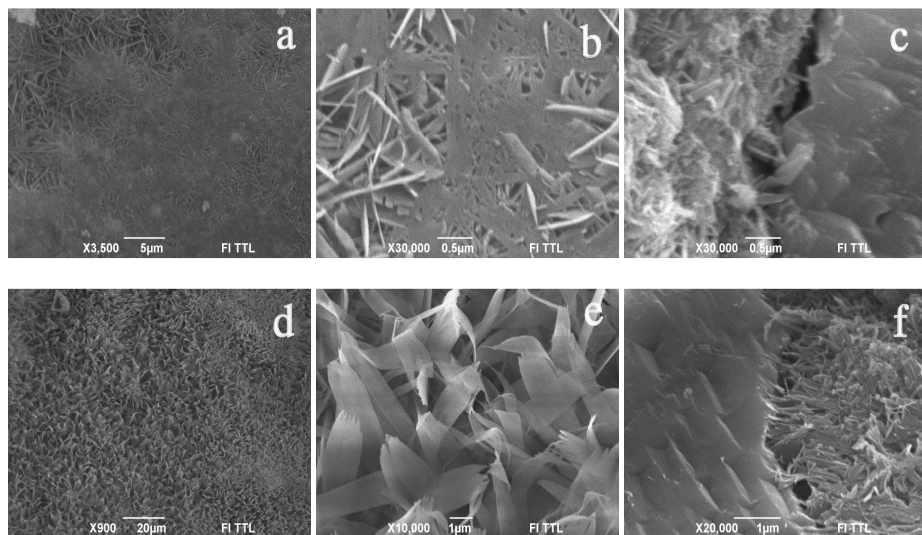
Šie tyrimai patvirtino ankstesnius AAB porų ploto ir perimetro nagrinėjame skerspjūvyje tyrimus. Nustatyta, kad AAB formavimo mišinyje naudojant labai smulkius AS ir AP priedus susidaro mažiau susisiekiančių porų.

### 3.2.2. Mikrostruktūra

Mikrostruktūros tyrimai atlikti su skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM). AAB mikrostruktūros skirtumus lengviausia pastebėti tiriant mikrostruktūrą paviršiniame porų sienelių sluoksnyje, kur yra tinkamiausios sąlygos susidaryti ir laisvai augti kalcio hidrosilikato kristalams nei kurioje nors kitoje kietėjančio AAB tūrio dalyje, nes kietinimo metu porose kaupiasi vandens garai. Be to, skeliant AAB jo struktūros tyrimams atlikti, porų sienelės lieka nesuirusios ir nėra pažeidžiama jų kristalinė struktūra. Todėl įvairių AAB sukietėjusių bandinių išsamosios medžiagos mikrostruktūrai palyginti buvo atliekami ir porų sienelių mikrostruktūros tyrimai.

Tyrimų rezultatai rodo, kad AS priedas labai stipriai veikia mikrostruktūros formavimąsi AAB bandinių kietėjimo metu (3.10 pav., d, e, f). AAB, neturinčio AS priedo (3.10 pav., a ir b), atveju paviršiniame porų sienelių sluoksnyje yra daug susidariusios amorfinės fazės, o kartu su ja susidarę kristalai yra daugiausia

adatinės formos. AS priedo turinčio AAB atveju paviršiniame porų sienelių sluoksnyje (3.10 pav., d ir e) amorfinės fazės nematyti. Čia susidarę plokšteliniai juostelių formos kristalai (3.10 pav., e). Taigi šio AAB struktūros kristališkumas yra kur kas didesnis nei bandinio, neturinčio AS priedo, skiriasi ir kristalų forma.



**3.10 pav.** AAB lūžio paviršiaus mikrostruktūros fragmentai:

a, b, c – be priedų; d, e, f – 1,0 % AS; a, b, d, e – porų sienelės mikrostruktūra, c, f – smėlio dalelės ir rišamosios medžiagos sąlyčio zona (nuotraukoje c smėlio dalelė yra dešinėje, nuotraukoje f smėlio dalelė – kairėje)

**Fig. 3.10.** Fragments of fracture surface microstructure of AAB:

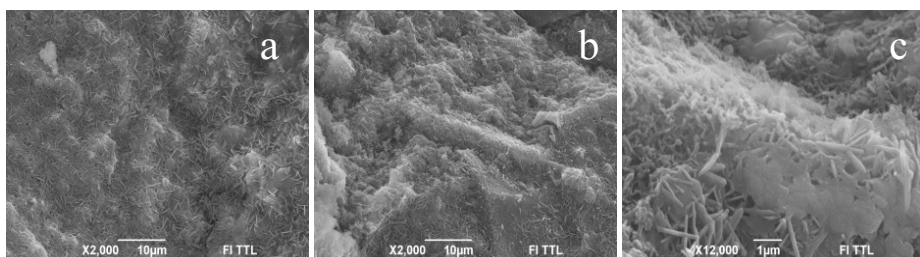
a, b, c – without additives; d, e, f – AS 1.0%; a, b, d, e – microstructure of pore wall; c, f – contact zone of sand particle and binding material (in the photo “c” the sand particle is on the right, in the photo “f” the sand particle is on the left)

Poras skiriančiose pertvarose tiek AS priedo neturinčio AAB, tiek ir šio priedo turinčio AAB atveju, aptinkamos malto smėlio dalelės. Jos AAB be AS priedo atveju (3.10 pav., c) prasčiau kontaktuoja su rišamąja medžiaga nei AAB, turinčio šio priedo, atveju (3.10 pav., f).

Aprašytuosius mikrostruktūros skirtumus lemia didesnis AS nei malto smėlio aktyvumas, lemiantis didesnę šarminio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ir rūgštinio ( $\text{SiO}_2$ ) komponentų reakcijos autoklave greitį.

Atlikus malto AP sąlyčio zonos su AAB matrica tyrimus nustatyta, kad jo dalelės apaugusios adatėlių formos kalcio hidrosilikato kristalais (C-S-H)

(3.11 pav.), t.y. autoklavinio kietinimo metu šiurkštus AP paviršius glaudžiai apaugo minėtais kristalais.



**3.11 pav.** AAB lūžio paviršiaus fragmentai su maltu 0,1 % AP priedu, kai skirtingas didinimas: a –  $\times 2000$ ; b –  $\times 2000$ ; c –  $\times 12\,000$

**Fig. 3.11.** Fragments of fracture surface microstructure in AAB with milled AP 0.1% additive, magnification: a –  $\times 2000$ ; b –  $\times 2000$ ; c –  $\times 12\,000$

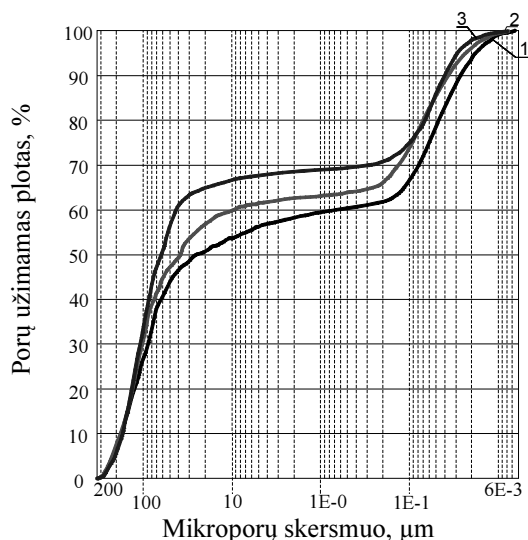
Atlikta mikrostruktūros analizė patvirtino kitų mokslininkų rezultatus, kad anglies pluoštas su rišamąja medžiaga chemiškai nesureagavo.

**Mikroporos.** „Poromaster 33“ atlikti tyrimai parodė užimamo mikroporų ploto priklausomybę nuo mikroporų skersmens ir kiekio (3.12 pav.). Taip pat nustatyta mikroporų užimamo tūrio priklausomybė nuo mikroporų skersmens ir skaičiaus (3.13 pav.). Atlikus užimamo mikroporų ploto tyrimus nustatyta, kad naudojant 1,0 % AS priedą AAB bandiniuose susidaro 6,1 % daugiau  $[0,105\text{--}0,006\text{ }\mu\text{m}]$  skersmens mikroporų (3.12 pav., 2 kreivė), o su 0,1 % AP priedu – 2,2 % (3.12 pav., 3 kreivė), lyginant su AAB be minėtų priedų (3.12 pav., 1 kreivė).

Užimamo mikroporų tūrio priklausomybė nuo jų skaičiaus ir skersmens parodė, kad AAB be priedų susidaro 65 %  $200\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$  skersmens, 6 %  $30\text{--}1,05\text{ }\mu\text{m}$  skersmens ir 29 %  $1,05\text{--}0,006\text{ }\mu\text{m}$  skersmens mikroporų (3.13 pav., 1 kreivė). Į AAB formavimo mišinį pridėjus AS priedo, susidaro 48 %  $200\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$  skersmens, 17 %  $30\text{--}1,05\text{ }\mu\text{m}$  skersmens, 35 %  $1,05\text{--}0,006\text{ }\mu\text{m}$  skersmens mikroporų (3.13 pav. 2 kreivė). Į AAB formavimo mišinį pridėjus AP priedo, mikroporų skaičius kito atitinkamai: 53 %  $200\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$  skersmens, 15 %  $30\text{--}1,05\text{ }\mu\text{m}$  skersmens ir 32 %  $1,05\text{--}0,006\text{ }\mu\text{m}$  skersmens (3.13 pav., 3 kreivė).

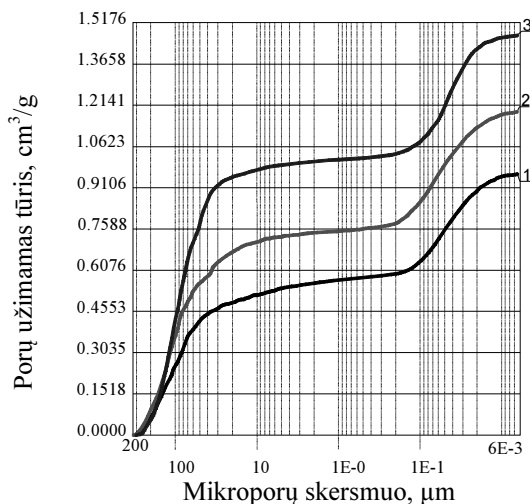
Nustačius porų ploto poveikį porų dydžiui, galima konstatuoti, kad, esant tam pačiam porų tūriui, mažėjant porų skersmeniui, didėja porų plotas (3.12 pav.).

Nustačius porų tūrio poveikį porų dydžiui, galima teigti, kad, mažėjant porų skersmeniui, didėja porų tūris (3.13 pav.).



**3.12 pav.** AAB esančių mikroporų ploto priklausomybė nuo jų skersmens, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.12.** Dependence of area of micropores in AAB specimens on their diameter at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

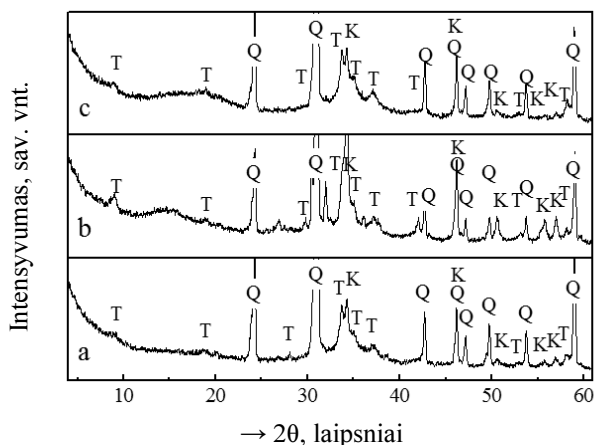


**3.13 pav.** AAB esančių mikroporų tūrio priklausomybė nuo jų skersmens, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.13.** Dependence of volume of micropores in AAB specimens on their diameter at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

Ištyrus porų sienelių mikrostruktūrą, nustatyta, kad, AAB formavimo mišinyje naudojant labai smulkius AS ir AP priedus, porų sienelėse susidarė mažiau didelių ir daug smulkių mikroporų. Tai sustiprino visą sukietėjusio betono karkasą ir gerino AAB stiprumo savybes.

**Rentgenografiniai tyrimai.** Rentgenografiniais tyrimais nustatyta (3.14 pav.), kad kietėjant tiek AAB be priedų (3.14 pav., a), tiek AAB su 1,0 % AS arba 0,1 % AP priedais (3.14 pav., b arba c), susidaro tobermoritas, ir lieka nesureagavusio smėlio (apie tai liudija kvarcui atitinkančios rentgenogramų smailės). Nustatyta, kad kvarcą ir tobermoritą atitinkančių smailių intensyvumas AAB su 1,0 % AS priedu, yra didesnis nei AAB be priedo. Tai visai suprantama, nes  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  intensyviau reaguoja su amorfiniu  $\text{SiO}_2$  nei su smėlį sudarančiu kristaliniu  $\text{SiO}_2$ . Esant amorfiniam ir kristaliniam  $\text{SiO}_2$ , reakcija pirmiausia vyksta su amorfiniu. Sukietėjusiuose AAB bandiniuose taip pat yra nedidelis kiekis kalcito (3.14 pav., b).



**3.14 pav.** AAB bandinių rentgenogramos tyrimai, kai priedo kiekis, %:

a – 0; b – 1,0 AS; c – 0,1 AP. Q – kvarcas; T – tobermoritas; K – kalcitas

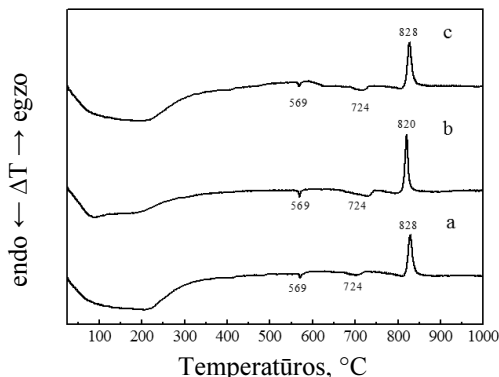
**Fig. 3.14.** XRD patterns of AAB specimens at the content of additive by %:

a – 0; b – 1.0 AS; c – 0.1 AP. Q – quartz; T – tobermorite; K – calcite

Taip pat nustatyta, kad naudojant 0,1 % AP priedą susidaro didesnis kiekis kristalinio tobermorito (3.14 pav., c) ir matomas mažesnis kalcito pikų intensyvumas.

**Termografiniai tyrimai.** Termografinės analizės rezultatai (3.15 pav.) patvirtina rentgenografinės analizės rezultatus. Tiek AAB, be priedų (3.15 pav., a), tiek AS arba AP priedo turinčiame AAB (3.15 pav., b arba c) yra ir tobermoritą (eg-

zoefektas, esantis 819–821 °C), ir kvarcą (endoeftas, esantis 568 °C arba 569 °C), ir kalcitą (endoeftas, esantis 723 °C, 724 °C arba 729 °C) atitinkantys efektai.



**3.15 pav.** AAB bandinių termogramos, kai priedo kiekis, %:

a – 0; b – 1,0 AS; c – 0,1 AP

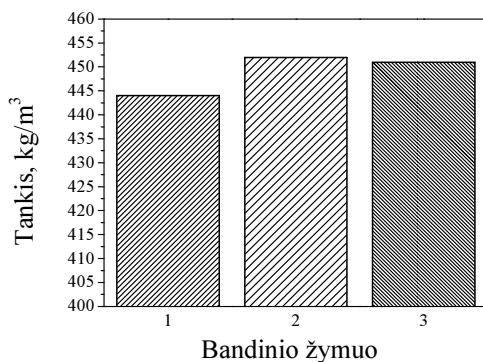
**Fig. 3.15.** DTA patterns of AAB specimens at the content of additive by %:

a – 0; b – 1.0 AS; c – 0.1 AP

Remiantis termografinės analizės rezultatais (3.15 pav.) galima teigti, kad AAB be priedų, kaip rodo endoefto temperatūros 100–280 °C intervale, turi daugiau amorfinės C-S-H fazės nei AS arba AP turintis AAB.

### 3.2.3. Tankis

AAB tankį lemia sukietėjusio rišiklio matricos makro- bei mikroporingumas.



**3.16 pav.** AAB bandinių tankis, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.16.** Density of AAB specimens at the content of additive by %: 1 – 0;

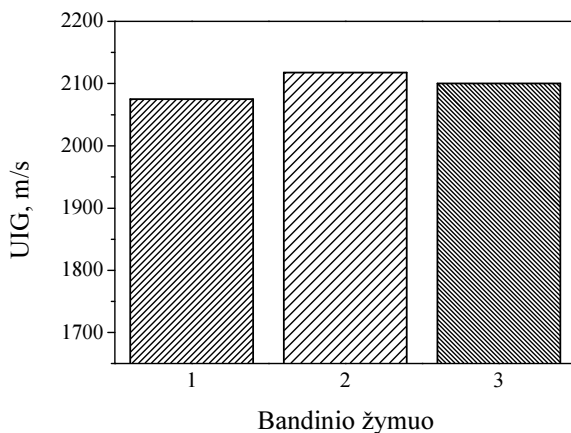
2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

Kuo AAB yra didesnio tankio, tuo mažesnis jo poringumas ir tai blogina AAB termoizoliacines savybes. Nustatyta, kad 1,0 % AS ir 0,1 % AP nedaug ~2 % didina AAB tankį, lyginat su AAB be priedų (3.16 pav.). Kadangi naudojami priedai labai nežymiai veikė AAB tankį, tai neturėjo poveikio jo šilumos laidumui. Tankio padidėjimą lemia naudojamų priedų poveikis AAB makro- ir mikrostruktūrai.

Naudojant priedus mikro- ir makrostruktūroje susidarė daugiau smulkių porų, kurios užima mažesnę plotą ir didesnę perimetą.

### 3.2.4. Ultragarso impulso sklaidimo greitis

Ultragarso impulso sklaidimo greičio (UIG) matavimų pokyčiais (3.17 pav.) galima įvertinti AAB tankio tolygumą, makrostruktūros pokyčius ir defektus.



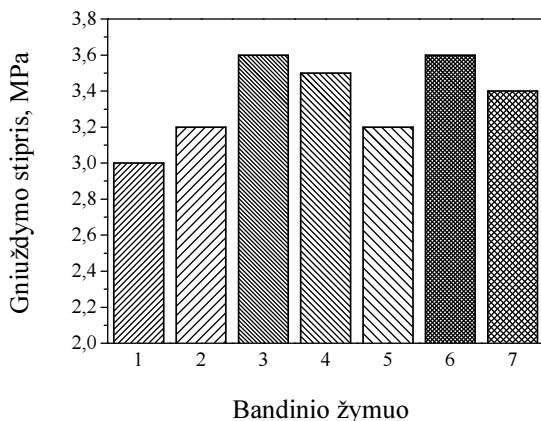
**3.17 pav.** AAB UIG, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.17.** UIG of AAB specimens at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

Naudojant priedus gautas didesnis kiekis smulkių porų ir didesnis porų sienelių sutankėjimas, per kurias ir sklinda ultragarso bangos. Naudoti priedai AAB nedaug padidino UIG. Naudojant AS priedą UIG padidėjo 2 % (3.17 pav., 2), o naudojant AP – 1 % (3.17 pav., 3), tai rodo, kad AAB makrostruktūra yra tolygesnė, tą patvirtina 3.6, c ir f paveikslai. UIG tyrimai patvirtino makrostruktūros ir tankio nustatymo tyrimus. Atlikus UIG tyrimus matyti, kad struktūroje vyrauja didesnis porų skaičius, mažesnis jų skersmuo ir tolygus pasiskirstymas visame bandinyje.

### 3.2.5. Gniuždymo stipris

AS ir AP priedai turi poveikį AAB gniuždymo stipriui. Labiausiai gniuždymo stipris padidėjo naudojant 1,0 % AS (3.18 pav., 3), stipris 20 % didesnis nei AAB be priedų (3.18 pav., 1). Tai lemia kietinimo metu susidarę didesni C-S-H kiekiai, kurių plokštelinės formos kristalai sustiprino visą AAB karkasą. Taip pat AAB bandinyje su AS priedu susidarė daugiau tobermorito. Naudojant didesnę AS priedo kiekį (1,5 %), gniuždymo stipris sumažėjo 8 % (3.18 pav., 4), lyginant su AAB su 1,0 % AS priedu (3.18 pav., 3). Tą nulėmė formavimo mišinio technologinių parametrų pokyčiai, t. y. esant labai smulkiam AS priedui ir nekeičiant V/K santykio, padidėjo AAB formavimo mišinio išsipūtimo aukštis ir didžiausioji temperatūra (3.3 ir 3.2 pav., 4 kreivė), susidarė daugiau susisiekiančių porų (3.6 pav., d). Tokiu atveju sumažėja ne tik plastiškasis (3.4 pav., 4), bet ir gniuždymo stipris.



**3.18 pav.** AAB gniuždymo stipris, kai priedo kiekis %: 1 – 0; 2 – 0,5 AS; 3 – 1,0 AS; 4 – 1,5 AS; 5 – 0,05 AP; 6 – 0,1 AP; 7 – 0,2 AP

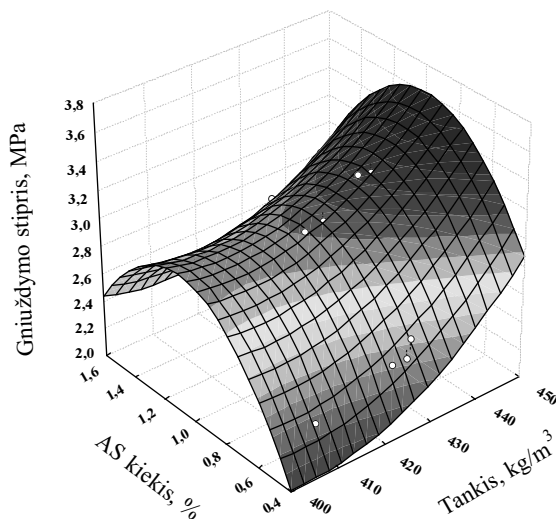
**Fig. 3.18.** Compressive strength of AAB specimens at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 0.5 AS; 3 – 1.0 AS; 4 – 1.5 AS; 5 – 0.05 AP; 6 – 0.1 AP; 7 – 0.2 AP

Skirtingų AP kiekių poveikiai AAB gniuždymo stipriui pateikti 3.18 paveiksle. AP priedo kiekis AAB formavimo mišinyje kito nuo 0,05 % iki 0,2 %, tačiau didžiausias gniuždymo stipris gautas esant 0,1 % AP, su didesniu (0,2 %) ar mažesniu (0,05 %) AP priedo kiekiu AAB gniuždymo stipris buvo mažesnis. AAB su 0,1 % AP gniuždymo stipris padidėjo 20 % (3.18 pav., 6). Tai lėmė AAB su AP priedu autoklavinio kietinimo metu susidarę kristalizacijos centrai, AP priedas apaugo adatėlės formos C-S-H.

Tyrimų rezultatai buvo palyginti su (Laukaitis 1999) tyrimais, kur buvo naudojamas su šlamu maltas anglies pluoštas, kurio buvo naudota 0,2 % kietų medžiagų masės, t. y. apie 2 kartus daugiau nei šiame darbe (0,1 % smėlio masės).

Gauti rezultatai buvo apdoroti statistiškai. Grafinis rezultatų apdorojimas pateiktas 3.19 ir 3.20 paveiksluose. Gniuždymo stipriui aprašyti gautos regresinės lygtys. Remiantis eksperimentiniais duomenimis buvo nustatytas ryšys tarp gniuždymo stiprio, tankio ir naudojamo priedo kiekio, kuris išreiškiamas netiesine regresine lygtimi su kvadratinu nuokrypiu  $S_r$  ir determinacijos koeficientu  $R^2$ .

Gautas tankio (400–450 kg/m<sup>3</sup> intervale) ir AS priedo kiekio (0,5–1,5 %) poveikis gniuždymo stipriui pateiktas 3.19 paveiksle, o naudojant AP priedą poveikis pateiktas 3.20 paveiksle. 3.1 formulėje pateikta, kaip, kintant AS priedo kiekiui ir tankiui  $\rho$  nagrinėjamuose intervaluose, kinta gniuždymo stipris  $\sigma_c$ . 3.2 formulėje pateikta, kaip AP priedas (0,05–0,2 % intervale) ir tankiui, esančiam nuo 400 kg/m<sup>3</sup> iki 450 kg/m<sup>3</sup> intervale, veikia gniuždymo stiprį.

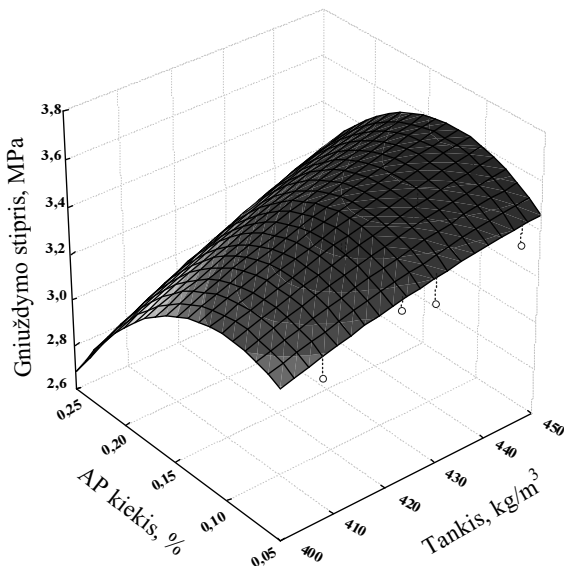


**3.19 pav.** AS priedo ir AAB tankio poveikis bandinių gniuždymo stipriui  
**Fig. 3.19.** Influence of AS additive and density of AAB on the compressive strength of specimens

$$\sigma_c = (170,3) + (-8,30) \cdot \rho + (19,34) \cdot AS + (0,010) \cdot \rho^2 + (-0,036) \cdot \rho \cdot AS + (-2,05) \cdot AS^2 \quad (3.1)$$

su standartiniu nuokrypiu  $S_r=0,0945$ , MPa, ir determinacijos koeficientu  $R^2=0,987$ .

$R^2$  rodo, kad AAB gniuždymo stipris 98,7 % priklauso nuo naudojamo AS priedo kiekio ir tankio.



**3.20 pav.** AP priedo ir AAB tankio poveikis bandinių gniuždymo stipriui

**Fig. 3.20.** Influence of AP additive and density of AAB on the compressive strength of specimens

$$\sigma_c = (-400,5) + (1,94) \cdot \rho + (-110,2) \cdot AP + (-0,002) \cdot \rho^2 + (0,298) \cdot \rho \cdot AP + (-54,3) \cdot AP^2 \quad (3.2)$$

su standartiniu nuokrypiu  $S_r=0,0566$ , MPa, ir determinacijos koeficientu  $R^2=0,9654$ .

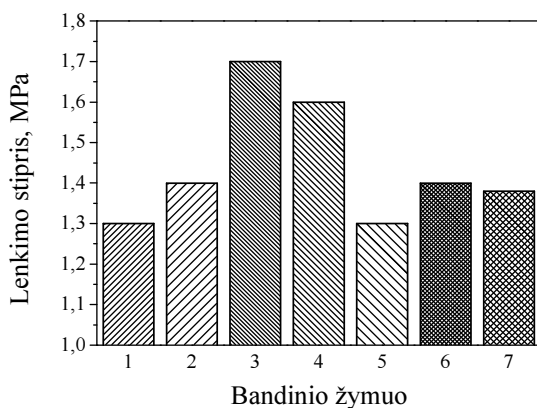
$R^2$  parodo, kad AAB gniuždymo stipris 96,5 % priklauso nuo naudojamo AP priedo kiekio bei tankio.

Pagal gautus rezultatus galima prognozuoti 400–450 kg/m<sup>3</sup> tankio intervale taškinę AAB gniuždymo stiprio vertę su norimu priedu ir jo kiekiu intervaluose: AS 0,5–1,5 %, AP 0,05–0,2 %.

### 3.2.6. Lenkimo stipris

Atlikus lenkimo stiprio tyrimus nustatyta, kad kaip ir gniuždymo stipriui AAB lenkimo stiprio padidėjimui didžiausią poveikį darė AS priedas esant geriausiam šio priedo kiekiui (1,0 %), lenkimo stipris padidėjo 31 %, lyginant su AAB be minėto priedo.

Skirtingų AP kiekių poveikiai AAB lenkimo stipriui pateikti 3.19 paveiksle. AP priedas didino ir gniuždymo, ir lenkimo stiprį dėl AAB bandinyje susidariusių kristalizacijos centrų. Su skirtingais AP priedo kiekiais (0,05 %, 0,1 %, 0,2 %) lenkimo stipris kito atitinkamai: 0 %, 8 %, 6 % (3.21 pav.).



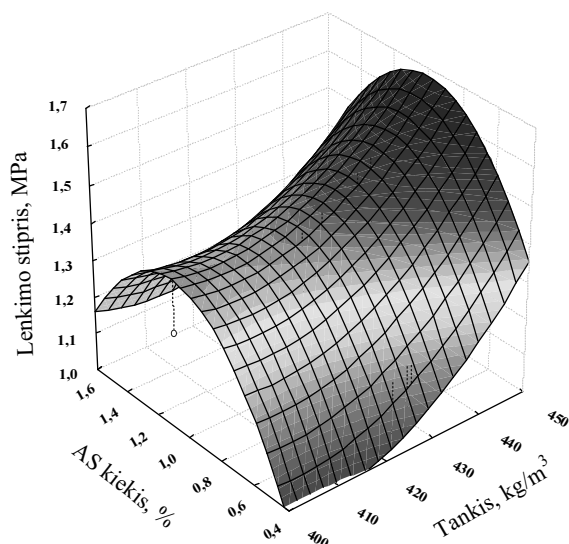
**3.21 pav.** AAB lenkimo stipris, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 0,5 AS;

3 – 1,0 AS; 4 – 1,5 AS; 5 – 0,05 AP; 6 – 0,1 AP; 7 – 0,2 AP

**Fig. 3.21.** Flexural strength of AAB specimens at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 0.5 AS; 3 – 1.0 AS; 4 – 1.5 AS; 5 – 0.05 AP; 6 – 0.1 AP; 7 – 0.2 AP

Gauti rezultatai buvo apdoroti statistiškai, išreikšti grafiškai ir formulėmis. Remiantis eksperimentiniais duomenimis buvo nustatytas ryšys tarp lenkimo stiprio, tankio ir tarp naudojamo priedo bei jo kiekio, išreiškiamo netiesine regresine lygtimi.

Gautas lenkimo stiprio poveikis nuo tankio (400–450 kg/m<sup>3</sup> intervale) ir nuo AS priedo kiekio (0,5–1,5 % intervale) pateiktas 3.22 paveiksle, o naudojant AP priedą poveikis pateiktas 3.23 paveiksle. 3.4 formulėje pateikta, kaip kintant AS priedo kiekiui ir tankiui  $\rho$  nagrinėjamuose intervaluose, kinta lenkimo stipris  $\sigma_f$ . 3.5 formulėje pateikta, kaip AP priedas (0,05–0,2 % intervale) ir tankis, esantis 400–450 kg/m<sup>3</sup> intervale, veikia lenkimo stiprį.



**3.22 pav.** AS priedo ir AAB tankio poveikis bandinių lenkimo stipriui  
**Fig. 3.22.** Influence of AS additive and density of AAB on the flexural strength of specimens

$$\sigma_f = (374,5) + (-1,83) \cdot \rho + (4,25) \cdot AS + (0,022) \cdot \rho^2 + (-0,008) \cdot \rho \cdot AS + (-0,452) \cdot AS^2 \quad (3.4)$$

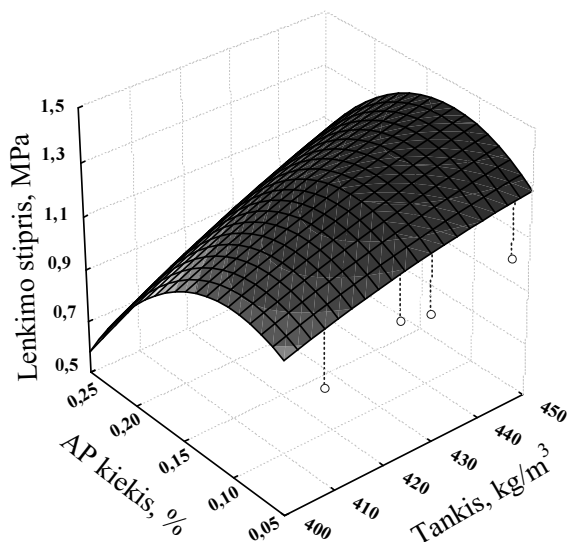
su standartiniu nuokrypiu  $S_r=0,0109$ , MPa ir determinacijos koeficientu  $R^2=0,9876$ .

$R^2$  rodo, kad AAB lenkimo stipris 98,8 % priklauso nuo naudojamo AS priedo kiekio ir tankio.

$$\sigma_b = (-88,1) + (0,426) \cdot \rho + (-24,2) \cdot AP + (-0,001) \cdot \rho^2 + (0,065) \cdot \rho \cdot AP + (-11,9) \cdot AP^2 \quad (3.5)$$

su standartiniu nuokrypiu  $S_r=0,0125$ , MPa, ir determinacijos koeficientu  $R^2=0,9654$ .

$R^2$  parodo, kad AAB lenkimo stipris 96,5 % priklauso nuo naudojamo AP priedo kiekio bei tankio.



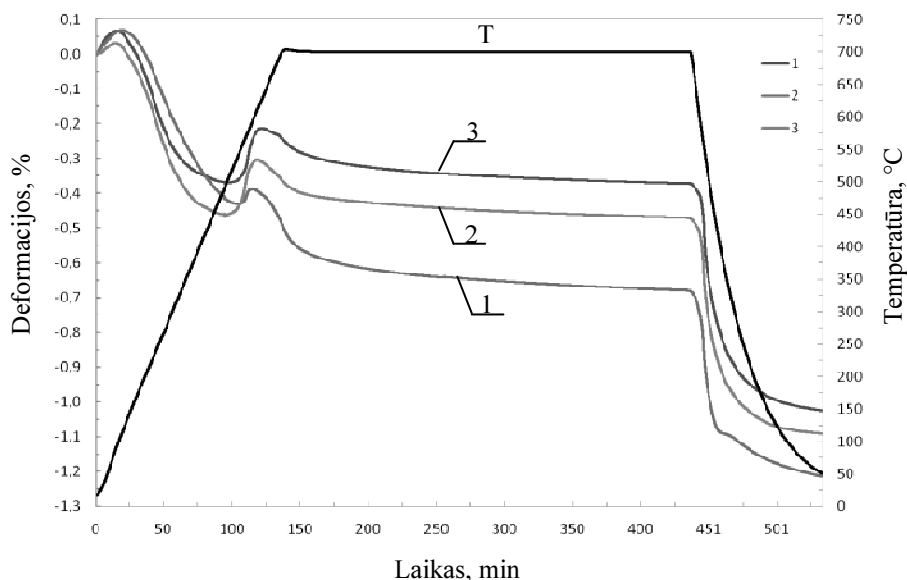
**3.23 pav.** AP priedo ir AAB tankio poveikis bandinių lenkimo stipriui  
**Fig. 3.23.** Influence of AP additive and density of AAB on the flexural strength of specimens

Pagal gautus rezultatus galima prognozuoti 400–450 kg/m<sup>3</sup> tankio intervale taškinę AAB lenkimo stiprio vertę su norimu priedu ir jo kiekiu intervaluose: AS 0,5–1,5 %, AP 0,05–0,2 %.

### 3.2.7. Terminė susitrauktis

AAB po dilatometrinio tyrimo, kai aukščiausia temperatūra siekė 700 °C, terminė susitrauktis (deformacija) sudarė 1,33 %. Nustatyta, kad AAB su AS ir AP priedais esant tai pačiai temperatūrai terminė susitrauktis mažėjo. Didesnio kristališkumo rišamosios medžiagos matrica susidarė AAB su 1,0 % AS priedo atveju ir tai lėmė didesnę AAB su šiuo priedu terminį atsparumą.

Dilatometriniai tyrimai parodė, kad AAB su AS priedu terminė susitrauktis sudarė 1,24 % ir buvo 6,8 % mažesnė nei AAB be priedo. Taip pat į AAB formavimo mišinį pridėjus 0,1 % AP priedo susidarė stipresnis AAB karkasas, nes po autoklavinio kietinimo AP priedas apauga adatėlių formos C-S-H taip sudarydami kristalizacijos centrus. Po dilatometrinio tyrimo AAB su AP priedu terminė susitrauktis sudarė 1,12%, tai 16 % mažiau nei AAB be priedų (3.24 pav.).



**3.24 pav.** AAB terminė susitrauktis, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP. T – temperatūros kitimo kreivė

**Fig. 3.24.** The thermal shrinkage of AAB specimens at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP. T – curve of temperature change

Tyrimai parodė, kad pridėjus minėtus priedus, galima išplėsti AAB panaudojimo sritį, pritaikyti jį konstrukcijose, reikalaujančiose didesnio bandinių terminio atsparumo (iki 700 °C).

### 3.2.8. Laidumas vandens garams

AAB laidumo vandens garams tyrimai rodo, kad ši savybė priklauso nuo uždary porų dydžio ir kiekio AAB tūryje. Eksperimento metu nustatytų AAB vidutinės laidumo vandens garams savybių vertės pateiktos 3.2 lentelėje.

Mažiausia vidutinė savitojo laidumo vandens garams vertė nustatyta naudojant AS priedą, kuri 6,6 % mažesnė nei AAB be priedų. AP priedas taip pat mažina laidumo vandens garams vertę.

Mažesnė laidumo vandens garams vertė parodo, kad AAB struktūroje susidaro daugiau uždary porų (tai ir patvirtina 3.2.1 skyrelyje pateiktus tyrimus), tai lemia mažesnę laidumą vandens garams.

**3.2 lentelė.** AAB bandinių su 1,0 % AS ir 0,1 % AP priedais vidutinės laidumo vandens garams savybių vertės

**Table 3.2.** Average values of water vapour transmission properties of AAB specimens with 1.0% AS and 0.1% AP additives

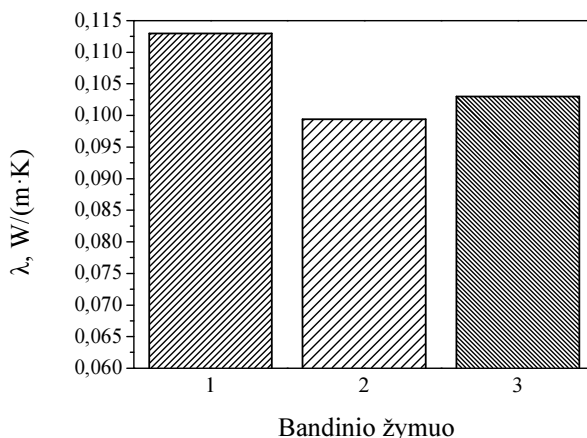
| AAB su skirtingais priedais ir jų kiekiais, % | Vandens garų srauto tankis, $g, mg/m^2 \cdot h$ | Vandens garų pernagos koeficientas, $W, mg/m^2 \cdot hPa$ | Garinė varža, $Z, m^2 \cdot h \cdot Pa/mg$ | Savitasis laidumas vandens garams, $\delta, mg/m \cdot h \cdot Pa$ | Santykinė garinė varža, $\mu, \delta_{oro}=0,703$ | Ekvivalentinis pagal difuziją oro sluoksnio storis, $S, m$ |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 0                                             | 4662                                            | 1,95                                                      | 0,513                                      | 0,0812                                                             | 8,65                                              | 0,360                                                      |
| 1,0 AS                                        | 4351                                            | 1,82                                                      | 0,549                                      | 0,0763                                                             | 9,22                                              | 0,386                                                      |
| 0,1 AP                                        | 4506                                            | 1,89                                                      | 0,530                                      | 0,0783                                                             | 8,97                                              | 0,373                                                      |

Laidumas vandens garams yra vertingi tyrimų duomenys, kurie labai reikalingi projektuotojams, skaičiuojantiems pastatų atitvarų konstrukcijas.

### 3.2.9. Šilumos laidumo koeficientas

AAB šiluminės savybės charakterizuojamos šilumos laidumo koeficientu.

Kadangi AAB yra akytosios struktūros, šilumos perdavimas medžiagoje nusakomas porų sienelių šilumos laidumu, dujinės fazės šilumos laidumu ir spinduliavimu tarp sienelių. AAB šilumos laidumo koeficientas yra vidutinis rodiklis, įvertinantis visus anksčiau išvardytus perdavimo būdus.



**3.25 pav.** AAB šilumos laidumas, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.25.** Thermal conductivity of AAB specimens at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

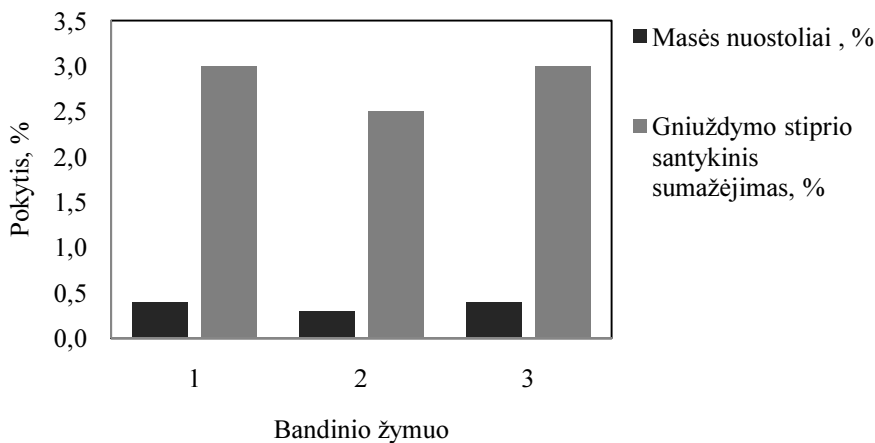
Atlikus šilumos laidumo koeficiento matavimą, nustatyta, kad priedai nedaug keičia AAB šilumines savybes. Didžiausią poveikį šilumos laidumo koeficiento sumažėjimui turėjo AS priedas, kuris šilumos laidumą sumažino 9 % (3.25 pav., 2), lyginant su AAB bandiniu be priedo (3.25 pav., 1).

Tyrimų rezultatai rodo, kad AAB su skirtingais priedais ir jų kiekiais (AAB be priedų, su 1,0 % AS arba su 0,1 % AP), kurių tankis –  $450 \text{ kg/m}^3$ , šilumos laidumas  $\lambda$  buvo atitinkamas: 0,113 W/(m·K), 0,099 W/(m·K), 0,103 W/(m·K) (3.25 pav.). Nors ir 3.2.3 skyrelyje pateikti tankio tyrimai rodo, kad priedai nedaug didina AAB bandinių tankį, tačiau šilumos laidumas, naudojant minėtus priedus, mažėja.

Šilumos laidumo tyrimai patvirtina 3.2.1 skyrelyje pateiktus tyrimus, t.y. pridėjus AS ir AP priedų gaunama daugiau uždarų ir smulkesnių porų turinti AAB struktūra.

### 3.2.10. Atsparumas šalčiui

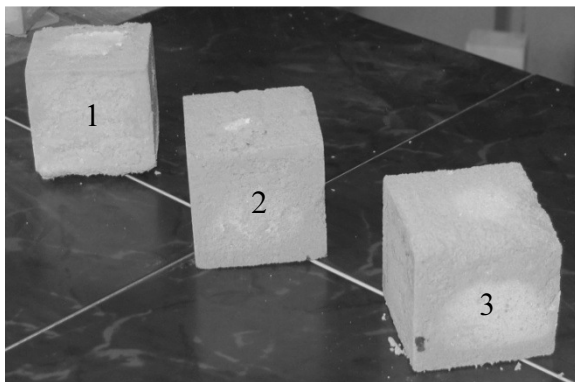
AAB bandinių su 1,0 % AS ir 0,1 % AP priedais atsparumas šalčiui nustatytas tūrinio šaldymo ir atšildymo būdu. AAB atsparumą šalčiui nusako šaldomų ir atšildomų bandinių masės nuostoliai ir jų gniuždymo stiprio pokytis (3.26 pav.), lyginant su kontrolinių bandinių mase ir gniuždymo stipriu.



**3.26 pav.** AAB pagrindinių bandinių vidutiniai masės nuostoliai ir gniuždymo stiprių santykiniai sumažėjimai po 35 šaldymo ir atšildymo ciklų, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

**Fig. 3.26.** Average of mass loss and relative decreases of compressive strengths of the main AAB specimens after 35 freeze and thaw cycles at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

Atlikus atsparumo šalčiui tyrimus nustatyta, kad priedai neturi didelio poveikio AAB bandinių masei ir gniuždymo stipriui. Pagal LST EN 15304 standarto reikalavimus AAB turi atlaikyti mažiausiai 15 šaldymo ir atšildymo ciklą, be didelių masės nuostolių ir gniuždymo stiprio sumažėjimo. AAB bandiniai su priedais ir be jų atlaikė 35 šaldymo ir atšildymo ciklus (2.27 pav.).



**3.27 pav.** AAB bandiniai po 35 šaldymo ir atšildymo ciklą, kai priedo kiekis, %: 1 – 0; 2 – 1,0 AS; 3 – 0,1 AP

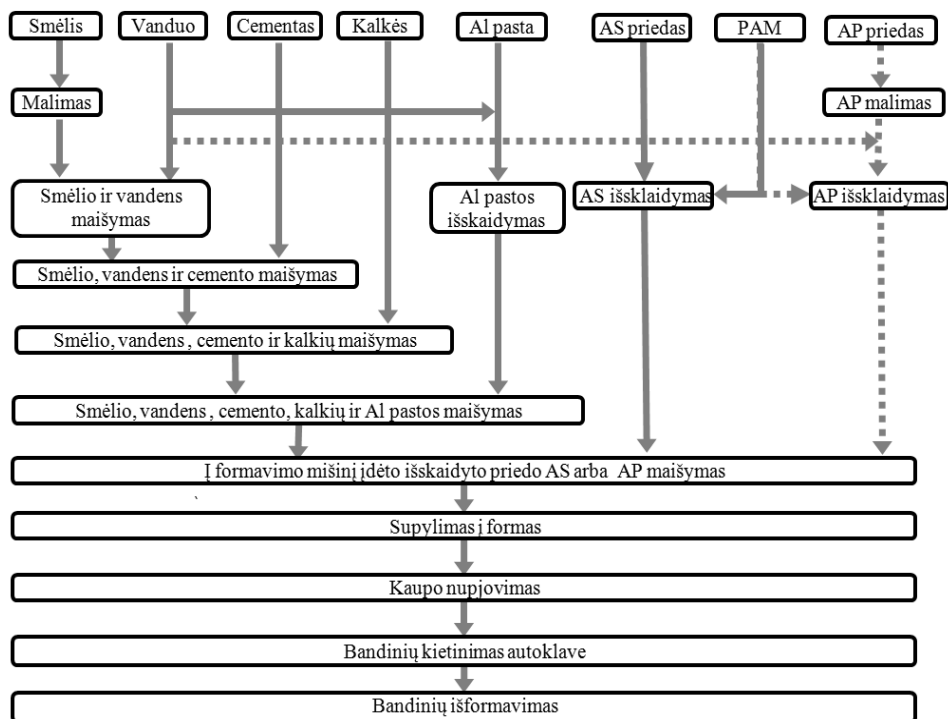
**Fig. 3.27.** AAB specimens after 35 freeze and thaw cycles at the content of additive by %: 1 – 0; 2 – 1.0 AS; 3 – 0.1 AP

Nors ir naudojant priedus, AAB struktūroje susidarė uždarytų porų, tačiau vanduo į sukiėtą betoną įsiskverbė per kapiliarus, todėl AAB su priedais atsparumas šalčiui nekito.

### 3.3. Autoklavinio akytojo betono su silicio dioksido mikrodulkių arba malto anglies pluošto priedu gamybos technologinė schema

Buvo parengta AAB su AS arba AP priedu gamybos technologinė schema (3.28 pav.).

Prieš sudedant visas žaliavas į AAB formavimo mišinį, jas reikia atitinkamai paruošti. Naudojamas kvarcinis smėlis malamas iki  $260\text{--}280\text{ m}^2/\text{kg}$  smulkmumo rutuliniu malūnu. AP priedas, taip pat malamas rutuliniu malūnu, kol dalelių dydis būna nuo  $0,6\text{ }\mu\text{m}$  iki  $20,0\text{ }\mu\text{m}$ . Prieš AS arba AP priedą sumaišant su formavimo mase, jų dalelės išsklaidomos 3 min ultragarsiniu smulkių dalelių sklaidikliu su 0,03 % PAM (Al pastos masės) ir dalimi (10 %) naudojamo vandens. Al pasta prieš dedant jas į formavimo mišinį, taip pat išsklaidomas 3 min.



3.28 pav. AAB su AS arba AP priedu gamybos technologinė schema  
 Fig. 3.28. Technological diagram of production for AAB with AS or AP additives

**Medžiagų maišymas.** Maltas smėlis ir vanduo maišomi propelerinėje maišyklėje 5 min. Paskui į mišinį suberiamas portlandcementis ir visa masė maišoma 1 min. Tada supylus kalkes maišoma 1 min. Paskui į formavimo mišinį su dalimi vandens dedama išskaidyta Al pasta ir maišoma 1 min. Tuomet dedamas pasirinktas (AS arba AP) išskaidytas priedas ir maišoma dar 1 min. Baigus maišyti formavimo masę supilama į formas. Apytiksliai po 16 min išsipūtęs formavimo mišinys įgauna plastiškąjį stiprį, tuomet nupjaunamas susidaręs formavimo mišinio kaupas. Nupjovus kaupą AAB kietinamas autoklave 5+10+5 h, 176 °C temperatūroje esant 0,8 MPa slėgiui. Po kietinimo AAB bandiniai išformuojami (3.28 pav.).

Buvo išleista AAB su AS priedu bandyminė partija UAB „Matuizų dujų silikatas“ gamykloje (Aktas pateiktas priede).

### 3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikti tyrimai parodė, kad  $\text{SiO}_2$  mikrodulkių (AS) ir malto anglies pluošto (AP) priedai turi teigiamą, bet skirtingą poveikį autoklavinio akytojo betono (AAB) formavimo mišinių ir bandinių savybėms. Remiantis formavimo mišinių ir stiprumo savybių tyrimais, nustatyti geriausi jų kiekiai: AS – 1,0 %, AP – 0,1 % smėlio masės.
2. Nustatyta, kad 1,0 % AS priedas 0,5 % mažino AAB formavimo mišinio sklidumą, bet didino temperatūrą, išsipūtimo aukštį ir plastiškąjį stiprį atitinkamai: 2 %, 11 % bei 286 %. Į AAB formavimo mišinį įdėtas 0,1 % AP mažino sklidumą, temperatūrą ir išsipūtimo aukštį atitinkamai 1 %, 2 % bei 10 %, bet padidino plastiškąjį stiprį 153 %.
3. Makrostruktūros tyrimai parodė, kad esant dideliame AS priedo smulkuumui (savitasis paviršius –  $20 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) dedant daugiau nei 1,0 % susidarė netolygi makrostruktūra. Tai rodo ir formavimo mišinio didžiausios temperatūros, išsipūtimo aukščio padidėjimas ir plastiškojo stiprio sumažėjimas. Naudojant AP priedą AAB makrostruktūroje susidarė daugiau uždarytų porų.
4. Rentgenografiniai ir termografiniai tyrimai parodė, kad AS priedas intensyviai reaguoja su kalkėmis ir skatina kalcio hidrosilikatų susidarymą, geresnį tobermorito išsikristalinimą. AP priedas nekeičia C-S-H fazinės sudėties, tačiau autoklavinio kietinimo metu AP paviršiniai įdubimai glaudžiai apaugo hidrosilikatais, o patys plaušeliai įsiterpia į porų sienelių membranas.
5. Nustatyta, kad naudojant priedus, esant tam pačiam mikroporų tūriui, mažėjant mikroporų skersmeniui, didėja mikroporų plotas bei, kad mažėjant mikroporų skersmeniui didėja mikroporų tūris.
6. Tankio ir UIG tyrimai parodė, kad naudojant AS priedą gaunama tankesnė mikrostruktūra ir tolygesnė makrostruktūra.
7. AAB su 1,0 % AS priedu gniuždymo stipris padidėjo 20 %, lenkimo stipris – 31 %, o AAB su 0,1 % AP priedu gniuždymo ir lenkimo stipriai padidėjo atitinkamai: 20 % ir 8 %.
8. Pagal gautus stiprių rezultatus išvestos regresinės lygtys, kuriomis remiantis galima prognozuoti 400–450  $\text{kg/m}^3$  tankio intervale taškinę AAB gniuždymo arba lenkimo stiprio vertę su norimu priedu ir jo kiekiu intervale: AS – 0,5–1,5 %, AP – 0,05–0,2 %.

9. Dilatometriniai tyrimai parodė, kad AAB su AS priedu terminė susitrauktis sudarė 1,24 % ir buvo 7 % mažesnis, o su AP priedu terminė susitrauktis sudarė 1,12 %, tai 16 % mažiau nei AAB be priedų. Terminė susitrauktis mažėjo dėl geresnio tobermorito išsikristalinimo. Tokiu atveju galima išplėsti AAB naudojimo sritį ir pritaikyti ją konstrukcijose, kurioms reikalingas didesnis terminis bandinių atsparumas (iki 700 °C)
10. Atlikus šilumos laidumo koeficiento, laidumo vandens garams ir šalčio atsparumo tyrimus, nustatyta, kad priedai nedaug veikia šias savybes. Didžiausią poveikį minėtoms AAB savybėms daro AS priedas – jis 12 % sumažina šilumos laidumo koeficientą, 7 % sumažina vidutinę savitojo vandens garų laidumo vertę, o atsparumas šalčiui praktiškai nekeičia.

---

## Bendrosios išvados

1. Tolygus priedų išsklaidymas pasiektas į paruoštą autoklavinio akytojo betono (AAB) formavimo mišinį pridėjus atskirai išsklaidytų Al pastos, silicio dioksido mikrodulkių (AS) arba malto anglies pluošto (AP) dalelių ir išmaišius 1 min. Nustatyti geriausi priedų kiekiai: AS – 1,0 %, AP – 0,1 % smėlio masės.
2. Dideliu pucolaniniu aktyvumu pasižymintis AS ir rišamosios medžiagos atžvilgiu inertiškas AP priedai nedaug keičia AAC formavimo mišinių sklidumą, išsipūtimo aukštį ir didžiausiąją temperatūrą, tačiau labai padidina plastiškąjį stiprį: AS priedas iki 286 %, AP 153 %.
3. AS priedas daro poveikį AAB savybėms:
  - keičia AAB makrostruktūrą, susidaro daugiau sferinės formos smulkesnių ir tolygiau pasiskirsčiusių uždarytų porų;
  - autoklavinio kietinimo metu priedo dalelės intensyviau reaguoja su kalkėmis nei maltas smėlis, dėl to susidaro gerai išsikristalinęs plokštelinės formos tobermoritas;
  - dėl išvardytų priežasčių AAB gniuždymo stipris padidėja iki 20 %, o lenkimo – iki 31 %.
4. Nustatyta, kad smulkiai maltas anglies pluoštas (suaktyvintu paviršiumi) priedas taip pat turi teigiamą poveikį AAB savybėms:

- hidroterminio AAB apdorojimo metu labai smulkios priedo dalelės atlieka kristalizacijos centrų vaidmenį, apauga adatėlių formos kalcio hidrosilikatais, tai užtikrina jų gerą sąlytį su porų sienelėmis;
  - dėl šių priežasčių AAB gniuždymo stipris padidėja iki 20 %, o lenkimo iki 8 %.
5. AAB su priedais porų senelėse susidaro daugiau smulkių mikroporų. Padidėjus uždaram poringumui sumažėjo AAB pagamintas su 1,0 % AS priedu šilumos laidumo koeficientas iki 12 % ir laidumas vandens garams – iki 7 %, o su 0,1 % AP priedu sumažėjo atitinkamai: iki 9 % ir 3 %.
  6. Dėl didesnio kalcio hidrosilikatų kristališkumo ir tvirtesnio karkaso mažėja AAB terminė susitrauktis. Tokį AAB galima naudoti kaip kaitrai atsparią medžiagą iki 700 °C.
  7. AAB, pagamintų su AS ir AP priedais, gniuždymo ir lenkimo stiprių rezultatai apibendrinti statistiškai. Išvestos regresinės lygtys, pagal kurias 400–450 kg/m<sup>3</sup> tankio intervale galima prognozuoti AAB gniuždymo arba lenkimo stiprio vertes.

---

## Literatūra ir šaltiniai

A report prepared by RILEM Technical 1978. Fibre concrete materials. *19-FRC community fibre reinforced cement composites*, 103–120.

Agar-Ozbek, A. S.; Weerheijm, J.; Schlangen, E.; Breugel, K. 2013. Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales, *Construction and Building Materials* 41: 480–490.

Ayudhya, B. I.; Ungkoon, Y. 2011. Bond strength of fiber reinforced polymer (FRP) bars in autoclaved aerated concrete (AAB), in *CICE 2010 – the 5<sup>th</sup> International Conference on FRP Composites in Civil Engineering September 27-29, 2010, Beijing, China*.

Ali, A. H. 1999. Effect of a waste – products mix on concrete strength and corrosion protection of steel reinforcement in sulphate media, *Corrosion Prevention and Control* 46(3): 76–81.

Al-Saud, T. S. M.; Bin Hussain, M. A. A.; Batyanovskii, E. I.; Zhdanok, S. A.; Krauklis, A. V.; Samtsou, P. P. 2011. Influence of carbon nanomaterials on the properties of cement and concrete, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 84(3): 546–553.

An, D.; Guo, Y.; Zou, B.; Zhu, Y.; Wang, Z. A. 2011. Study on the consecutive preparation of silica powders and active carbon from rice husk ash, *Biomass and Bioenergy* 3(5): 1227–1234.

Arreshvhina, N.; Fadhadli, Z.; Mohd Warid, H.; Zuhairy, A. H.; Roswadi, H. 2006. Microstructural behaviour of aerated concrete containing high GGBFS, in *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference, 5–6 September 2006, Kuala Lumpur, Malaysia*: 45–53.

Artamonova, O. V.; Korotkikh, D. N.; Chernyshev, E. M. 2006. Formation of the structure of hydrosilicate systems modified with ultra- and nanoparticles and control of their strength properties, in *Proc. I international Conference on Deformation and Destruction of Materials, Moscow, November 13–16, 2006*: 514–516.

Aziz, M. A.; Aleem, S.; Heikal, M. 2012. Physico-chemical and mechanical characteristics of pozzolanic cement pastes and mortars hydrated at different curing temperatures, *Construction and Building Materials* 26: 310–316.

Badr, A.; Brooks, J. J.; Abdel Reheem, A. H.; El-Saeid, A. 2000. Impact resistance and compressive strength of steel and organic natural fibre reinforced concretes, in *Proceedings of the tenth BCA concrete communication conference*, Birmingham University, U. K., 347–354.

Batyanovskii, E. I.; Krauklis, A. V.; Samtsov, P. P.; Ryabčikov P. V.; Samtsov P. P. 2010. Influence of carbon nanomaterials on the properties of cement and cement paste, *Building Technology* 1(2): 3–10.

Batyanovskii, E. I.; Ryabčikov, P. V.; Yakimovič, V. D. 2009. Nanotechnologies and carbon nanomaterials in the constructional material science, *Building Technology* 24(3): 22–29.

Brandt, A. M.; Glinicki, M. A.; Potrzebowski, J. 1996. Application of FRC in construction of the underground railway track, *Cement Concrete Composites* 18(5): 12–305.

Brykov, A. S.; Kamaliev, R. T.; Mokeev, M. V. 2010. Influence of ultradispersed silica on portland cement hydration, *Russian Journal of Applied Chemistry* 83(2): 208–213.

Campillo, I.; Dolado, J. S.; Porro, A. 2003 High-performance nanostructured materials for construction, in *1<sup>st</sup> International Symposium on Nanotechnology in Construction*: 110–121.

Chan, S. Y. N.; Ji, X. 1999. Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes, *Cement and Concrete Composites* 21(4): 293–300.

Chernyshov, E. M.; Korotkikh, D. N. 2008. Cement-stone structures modified by micro- and nanodimensional silica particles, *Building Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century* 5: 30–32.

Chung, D. D. L. 2004. Cement-matrix structural nanocomposites, *Metals and materials* 10(1): 55–67.

Cicek, T.; Tanriverdi, M. 2007. Lime based steam autoclaved fly ash bricks, *Construction and Building Materials* 21: 1295–1300.

Сеземан, Г. В.; Сеница, М. С.; Захарченко, П. В.; Щербина, Н. А.; Пивень, Н. Н. 2010. Высыхание наружных стен из автоклавного ячеистого бетона с системой скрепленной теплоизоляции в процессе эксплуатации зданий, *6-я международная научно-практическая конференция, Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения, Минск, 26–28 мая 2010*: 125–128.

Černý, R.; Němečková, J.; Rovnaníková, P.; Bayer, P. 2007. Effect of thermal decomposition on the thermal properties of carbon fiber reinforced cement composites in high-temperature range, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 90(2): 475–488.

Daukšas, K.; Barkauskas, J.; Daukšas, V.; Daumantas, E.; Kabailienė, M.; Kareiva, A.; Mačionis, Z.; Naruškevičius, L.; Sasnauskienė, S.; Skyčius, V. 2003. *Chemijos terminų aiškinamasis žodynas*. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas. 659 p.

Davraz, M.; Gunduz, L. 2005. Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete, *Cement and Concrete Research* 35(7): 1251–1261.

Dunster, A. 2009. Silica fumes in concrete, in *Information Paper N° IP 5/09, IHS BRE Press, Garston, U.K.*: 1–12.

Faiz, S.; Ahmed, U.; Maalej, M.; Paramasivam, P. 2007. Flexural responses of hybrid steel-polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash, *Construction and Building Materials* 21(5): 1088–1097.

- Fu, X.; Chung, D. D. L. 1998a. Effects of water – cement ratio, curing age, silica fume, polymer admixtures, steel surface treatments, and corrosion on bond between concrete and steel reinforcing bars, *ACI Materials Journal* 95(6): 725–734.
- Fu, X.; Chung, D. D. L. 1998b. Improving the bond strength of concrete to reinforcement by adding methylcellulose to concrete, *ACI Materials Journal* 95(5): 601–608.
- Garcés, P.; Fraile, J.; Vilaplana-Ortego, E.; Cazorla-Amorós, D.; Alcocel, E.G.; Andión, L.G. 2005. Effect of carbon fibres on the mechanical properties and corrosion levels of reinforced portland cement mortars, *Cement and Concrete Research* 35 (2): 324–331
- Giner, V. T.; Baeza, F. J.; Ivorra, S.; Zornoza, E.; Galao, O. 2012. Effect of steel and carbon fiber additions on the dynamic properties of concrete containing silica fume, *Materials and Design* 34: 332–339.
- Girniienė, I.; Laukaitis, A. 2002. Kietinimo parametrų įtaka putų cementbetonio stipriui ir naujadary fazinei sudėčiai, *Materials Science (Medžiagotyra)* 8(1): 310–316.
- Goberis, S.; Antonovič, V. 2007. *Kaitrai atsprūs šamotbetonai*: monografija. Vilnius: Technika. 360 p.
- Goberis, S.; Antonovič, V.; Pundienė, I.; Stonys, R. 2007. Effect of the quality of microsilica on the spreadability properties of cement slurry and characteristics of low-cement refractory concrete on a chamotte filler, *Refractories and Industrial Ceramics* 48(2): 123–127.
- Hamad, B. S.; Sabbah, S. M. 1998. Bond of reinforcement in eccentric pullout silica fume concrete specimens, *Materials and Structures* 31(214): 707–713.
- Han, B.; Yu, X.; Ou, J. 2011. Multifunctional and smart carbon nanotube reinforced Cement-Based Materials, *Nanotechnology in Civil Infrastructure*: 1–47.
- Han, Ch. G.; Hwang, Y. S.; Yang, S. H.; Govvripalan, N. 2005. Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement, *Cement and Concrete Research* 35: 1747–1753.
- Hanecka, C.; Koronthalyova, O.; Matiasovsky, P. 1997. The carbonation of autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research* 27(4): 589–99.
- Hauser, A.; Eggenberger, U.; Mumenthaler, T. 1999. Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete, *Cement and Concrete Research* 29(3): 297–302.
- Houst, Y. F.; Bowen, P.; Perche, F.; Kauppi, A.; Borget, P.; Galmiche, L.; Meins, J. F.; Lafuma, F.; Flatt, R. J.; Schober, I.; Banfill, P. F.G.; Swift, D. S.; Myrvold, B. O.; Petersen, B. G.; Reknes, K. 2008. Design and function of novel superplasticizers for more durable high performance concrete (Superplast Project), *Cement and Concrete Research* 38(10): 1197–1209.
- Huang, X.; Ni, W.; Cui, W.; Wanga, Z.; Zhu, L. 2012. Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag, *Construction and Building Materials* 27: 1–5.
- Isu, N.; Ishida, H.; Mitsuda, T. 1995. Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete-tobermorite formation, *Cement and Concrete Research* 25(2): 243–248.
- Yahia, A.; Khayat, K. H.; Benmokrane, B. 1998. Evaluation of cement grouts for embedding anchors under water, *Materials and Structures* 31(208): 267–274.
- Yakovlev, G. I.; Pervushin, G. N.; Buryanov, A. F.; Kodolov, V. I.; Krutikov, V. A.; Fisher, H. B.; Kerienė, J. 2009. Modification of porous cement matrixes with carbon nanotubes, *Constructional materials* 3: 99–102.
- Yakovlev, G., I. 2006. Nanoatomized reinforcement in a cement foam concrete, *Concrete Technology* 3: 68–71.

- Yakovlev, G.; Kerienė, J.; Gailius, A.; Girnienė, I. 2006. Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes, *Materials Science (Medžiagotyra)* 12(2): 147–151.
- Ji, T. 2005. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>, *Cement and Concrete Research* 35(10): 1943–1947.
- Jo, B. W.; Kim, C. H.; Tae, G.; Park, J. B. 2007. Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles, *Construction and Building Materials* 21(6): 1351–1355.
- Just, A.; Middendorf, B. 2009. Microstructure of high-strength foam concrete, *Materials Characterization* 7(60): 741–748.
- Kar, A.; Ray, I.; Unnikrishnan, A.; Davalos, F. J. 2012. Microanalysis and optimization-based estimation of C-S-H contents of cementitious systems containing fly ash and silica fume, *Cement and Concrete Composites* 34(3): 419–429.
- Kearsley, E. P.; Wainwright, P. J. 2001. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, *Cement and Concrete Research* 31(1): 105–112.
- Kerienė, J., R. 2006. *Statybinių medžiagų struktūros ir jos įtakos medžiagų savybėms tyrimai*. Habilitacijos procedūrai teikiamų mokslo darbų apžvalga. Vilnius: Technika. 48 p.
- Kjellsen, K. O.; Wallevik, O. H.; Hallgren, M. 1999. On the compressive strength development of high performance concrete and paste – effect of silica fume, in *Materials and Structures/Matériaux et Constructions, January-February 1999*, 32: 63–69.
- Kligys, M. 2009. *Kompozitinės medžiagos iš poringosios cemento teslos ir trupinto polistireninio putplasčio gamybos technologija ir savybės*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 135 p.
- Komokhov, P. G.; Aleksandrov, N. I. 2008. Nanostructured radiative concrete and its universality, *Building Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century* 5: 38–40.
- Korolev, E. V.; Bazhenov, Yu. M.; Beregovoi, V. A. 2006. Modification of building materials by carbon nanotubes and fullerenes, *Building Materials* 9: 2–4.
- Kunhanandan Nambiar, E. K.; Ramamurthy, K. 2007a. Air-void characterisation of foam concrete, *Cement and Concrete Research* 37(2): 221–230.
- Kunhanandan Nambiar, E. K.; Ramamurthy, K. 2007b. Sorption characteristics of foam concrete, *Cement and Concrete Research* 37(9): 1341–1347.
- Lau, A., Anson, M. 2006. Effect of high temperature on high performance steel fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Research* 36: 1698–1707.
- Laukaitis, A. 1999. *Technologinių veiksnių įtaka akytojo betono formavimo mišinių ir produktų savybėms*. Habilitacinis darbas. Kaunas. 101 p.
- Laukaitis, A. 2000. *Akytųjų betonų formavimo mšinių ir gaminių savybės*: monografija. Vilnius: Technika. 232 p.
- Laukaitis, A.; Dudik, A.; Kerienė, J. 1999. Pluoštinių priedų įtaka putų cementbetonio mikrostruktūrai ir fizikinėms mechaninėms savybėms, *Cheminė technologija* 3(12): 87–92.
- Laukaitis, A.; Kerienė, J.; Mikulskis, D.; Sinica, M.; Sezemanas, G. 2009. Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products, *Construction and Building Materials* 23(9): 3034–3042.
- Laurent, J. P.; Guerre-Chaley, C. 1995. Influence of water content and temperature on the thermal conductivity of autoclaved aerated concrete, *Materials Structures* 28: 164–172.
- Lee, H. T.; Neethling, S. J.; Cilliers, J. J. 2005. Particle and liquid dispersion in foams, *Colloids and Surfaces a: Physicochemical and Engineering Aspects* 263: 320–329.
- Leškevičienė, V.; Mandeikytė, N.; Urbonas, L. 2005. The influence of limestone, opoka and tripoli additives on the hydration and properties of portland cement, *Chemical Technology* 4(38): 62–66.

- Li, H.; Xiao, H. G.; Yuan, J.; Ou, J. 2004a. Microstructure of cement mortar with nano-particles, *Composites Part B: Engineering* 35(2): 185–189.
- Li, H.; Xiao, H.; Yuan, J.; Ou, J. 2004b. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials, *Cement and Concrete Research* 34(3): 435–438.
- Li, Z.; Xu, M.; Chui, N. C. 1998. Enhancement of rebar (smooth surface) concrete bond properties by matrix modification and surface coatings, *Magazine of Concrete Research* 50(1): 49–57.
- Lotov, V. A. 2006. Nanoatomized systems and technologies of building materials, *Building Materials* 8: 10–12.
- LST 1436:1996 *Autoklaviniai silikatiniai gaminiai. Terminai ir apibrėžimai*. Vilnius, 1996. 47 p.
- LST EN 15304:2010. *Autoklavinio akytojo betono atsparumo šalčiui nustatymas*. Vilnius, 2010. 19 p.
- LST EN 1351:2000. *Autoklavinio akytojo betono stiprio lenkiant nustatymas*. Vilnius, 2000. 11 p.
- LST EN 1745:2012. *Mūras ir jo gaminiai. Šiluminių savybių nustatymo metodai*. Vilnius, 2012. 76 p.
- LST EN 678:2000. *Autoklavinio akytojo betono tankio nustatymas*. Vilnius, 2000. 5 p.
- LST EN 679:2006. *Autoklavinio akytbetonio gniuždomojo stiprio nustatymas*. Vilnius, 2006. 7 p.
- LST EN 772-15:2002. *Mūro gaminių bandymo metodai. 15 dalis. Autoklavinio akytojo betono mūro gaminių vandens garų pralaidumo nustatymas*. Vilnius, 2002. 7 p.
- Marčiukaitis, G. 2007. *Statybinės medžiagos ir konstrukcijos*. Vilnius: Technika. 88 p.
- Matsui, K.; Kikuma, J.; Tsunashima, M.; Ishikawa, T.; Matsuno, S.; Ogawa, A.; Sato, M. 2011. In situ time-resolved X-ray diffraction of tobermorite formation in autoclaved aerated concrete: Influence of silica source reactivity and Al addition, *Cement and Concrete Research* 41(5): 510–519.
- Middendorf, B.; Singh, N. B. 2006. Nanoscience and nanotechnology materials, *Cement International* 4: 80–86.
- Mikulskis, D. 2007. *Pluoštinių priedų įtaka autoklavinio akytojo betono savybėms*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 107 p.
- Mollah, M. Y. A.; Adams, W. J.; Schennach, R.; Cocke, D. L. 2000. A review of cement–superplasticizer interactions and their models, *Advance Chemical Research* 12: 153–161.
- Morsy, M. S. 1999. Effect of temperature on electrical conductivity of blended cement pastes, *Cement and Concrete Research* 29(4): 603–606.
- Mostafa, N.Y. 2005. Influence of air-cooled slag on physicochemical properties of autoclaved aerated concrete, *Cement and Concrete Research* 35(7): 1349–1357.
- Mukhopadhyay, A. K. 2011. Next-Generation nano-based concrete construction products: a review, *Nanotechnology in Civil Infrastructure*: 207–223.
- Narayanan, N.; Ramamurthy. 2000a. Microstructural investigations on aerated concrete, *Cement and Concrete Research* 30(3): 457–464.
- Narayanan, N.; Ramamurthy. K. 2000b. Structure and properties of aerated concrete: a review, *Cement and Concrete Composites* 22(5): 321–329.
- Oskoue, V. A.; Kivi, M. P.; Boroujeni, S. T. 2011. Effect of CFRP and GFRP confinement on behaviour of square lightweight concrete specimens, in *CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering September 27–29, 2010, Beijing, China*.
- Papadakis, V., G.; Pedersen E., J.; Lindgreen, H. 1999. An AFM-SEM investigation of the effect of silica fume and fly ash on cement paste microstructure, *Journal of Materials Science* 34: 683–690.

Park, S. B.; Yoon, E. S.; Lee, B. I. 1999. Effects of processing and materials variations on mechanical properties of lightweight cement composites, *Cement and Concrete Research* 29(2): 193–200.

Petrov, I.; Schlegel, E. 1994. Application of automatic image analysis for the investigation of autoclaved aerated concrete structure, *Cement and Concrete Research* 24(5): 830–840.

Pigeon, M.; R. 1998. Flexural properties of steel fiber – reinforced concretes at low temperatures, *Cement and Concrete Composites* 20(5): 365–375.

Pivinskii, Yu. E. 2008. Nanodispersed silica and some aspects of nanotechnology in the field of silica materials science. Part 3, *Refractories and Industrial Ceramics* 49(1): 32–43.

Pukharensko, Yu. V.; Nikitin, V. A.; Letenko, D. G. 2006. Nanostructurization of tempering water as a method of increasing the efficiency of plasticizers of concrete mixes, *Building materials* 9: 11–13.

Pundienė, I. 2000. *SiO<sub>2</sub> mikrodulkių įtaka mažacemenčių kaitrai atsparių betonų iš šamoto atliekų savybėms*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 103 p.

Quercia, G.; Hüskens, G.; Brouwers, H., J. 2012. Water demand of amorphous nanosilica and its impact on the workability of cement paste, *Cement and Concrete Research* 42(2): 344–357.

Reis, J. M. L.; Ferreira, A. J. M. 2006. Freeze-thaw and thermal degradation influence on the fracture properties of carbon and glass fiber reinforced polymer concrete, *Construction and Building Materials* 20: 888–892.

Riahi, S.; Nazari, A. 2011. Physical, mechanical and thermal properties of concrete in different curing media containing ZnO<sub>2</sub> nanoparticles, *Energy and Buildings* 43(8): 1977–1984.

Saafi, M. 2009. Wireless and embedded carbon nanotubes networks for damage detection in concrete structures, *Nanotechnology* 20: 395–502.

Said, A., M.; Zeidan, M. S.; Bassuoni, M. T.; Tian, Y. 2012. Properties of concrete incorporating nano-silica, *Construction and Building Materials* 36: 838–844.

Sánchez de Rojas, M. I.; Rivera, J.; Frías, M. 1999. Influence of the microsilica state on pozzolanic reaction rate, *Cement and Concrete Research* 29(6): 945–949.

Shi, C.; Day, L. R. 2000a. Pozzolanic Reaction in the presence of chemical activators: Part II – reaction products and mechanism, *Cement and Concrete Research* 30(4): 607–613.

Shi, C.; Day, L. R. 2000b. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators: Part I. reaction kinetics, *Cement and Concrete Research* 30(1): 51–68.

Silva, D. A.; Betioli, A. M.; Gleize, P. J. P.; Roman, H. R.; Gómez, L. A.; Ribeiro, J. L. D. 2005. Degradation of recycled PET fibers in portland cement-based materials, *Cement and Concrete Research* 35(9): 1741–1746.

Sinica, M. 2001. *Dispersinių ir pluoštinių intarpų įtaka kompozitų iš porizuoto betono savybėms*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 44 p.

Sinica, M.; Sezemanas, G.; Mikulskis, D.; Česnauskas, V. 2005. Drėgnio įtaka akytojo betono savybėms, *Cheminė technologija* 4(38): 82–85.

Sobolev, K.; Ferrada-Gutierrez, M. 2006. How nanotechnology can change the concrete world. Part 2, *American Ceramic Society Bulletin* 11: 6–19.

Song, Y.; Zhang, Y. 1999. Prestressing losses in lightweight concrete members, *International Offshore and Polar Engineering Conference* 4: 259–263.

Stonys, R. 2003. *SiO<sub>2</sub> mikrodulkių įtaka kaitrai atsparaus kompleksinio rišiklio ir betono savybėms*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 100 p.

- Šarka, V. 2008. *Sprendimų paramos sistema statyboje taikant daugiakriterinius sintezės metodus*. Vilnius: Technika. 97 p.
- Thomas, M. D. A.; Shehata, M. H.; Shashiprakash, S. G.; Hopkins, D. S.; Cail, K. 1999. Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete, *Cement and Concrete Research* 29(8): 1207–1214.
- Valipour, M.; Pargar, F.; Shekarchi, M.; Khani, S. 2013. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: a laboratory study, *Construction and Building Materials* 41: 879–888.
- Vauchskii, M. N. 2004. Directed formation of an ordered overmolecular structure of hydrated mineral binders, *Vestn Civil Institute* 2(3): 44–47.
- Vektaris, B.; Vilkas, V. 1999. SiO<sub>2</sub> mikrodulkių, įtaka portlandcemenčio kietėjimui ir betono sa-vybėms, *Cheminė technologija* 2(11): 60–64.
- Vijayarethinam, N. 2009. Silica fumes applications, in *World Cement, January 2009*: 97–100.
- Wang, X. H.; Jacobsen, S.; Lee, S. F.; He, J. Y.; Zhang, Z. L. 2010. Effect of silica fume, steel fiber and ITZ on the strength and fracture behaviour of mortar, *Materials and Structures* 43: 125–139.
- Wang, X., Y.; Lee, H., S. 2012. Modelling of hydration kinetics in cement based materials considering the effects of curing temperature and applied pressure, *Construction and Building Materials* 28(1): 1–13.
- Wongkeo, W.; Chaipanich, A. 2010. Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume, *Materials Science and Engineering* 527: 3676–3684.
- Wongkeo, W.; Thongsanitgarn, P.; Chaipanich, A. 2012a. Compressive strength and drying shrinkage of fly ash-bottom ash-silica fume multi-blended cement mortars, *Materials and Design* 36: 655–662.
- Wongkeo, W.; Thongsanitgarn, P.; Pimraksa, K.; Chaipanich, A. 2012b. Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials, *Materials and Design* 35: 434–439.
- Xu, Y.; Chung, D. D. L. 1999a. Effect of admixtures on the thermal and thermomechanical behaviour of cement paste, *ACI Materials Journal* 96(4): 455–461.
- Xu, Y.; Chung, D. D. L. 1999b. Effect of carbon fibbers on the vibration reduction ability of cement, *Cement and Concrete Research* 29(7): 1107–1109.
- Xu, Y.; Chung, D. D. L. 2000a. Improving silica fume cement by using silane, *Cement and Concrete Research* 30(8): 1305–1311.
- Xu, Y.; Chung, D. D. L. 2000b. Reducing the drying shrinkage of cement paste by admixture surface treatments, *Cement and Concrete Research* 30(2): 241–245.
- Zain, M. F. M.; Safiuddin, Md.; Mahmud, H. 2000. Developement of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder rations, *Cement and Concrete Research* 30(9): 1501–1505.
- Zelić, J.; Jozić, D.; Krpan-Lisica, D. 2009. Synergistic action of a ternary system of portland cement – limestone – silica fume in concrete, *Nanotechnology in Construction* 3: 425–434.
- Zemajtis, J.; Weyers, R. E.; Sprinkel, M. M. 1999. Corrosion protection service life of low-permeable concretes and low-permeable concrete with a corrosion inhibitor, *Transportation Research Record*, 57–59.

Zhang, M. H.; Islam, J. 2012. Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag, *Construction and Building Materials* 29: 573–580.

Zhang, X.; Sun, W. 2012. Electromagnetic shielding and absorption properties of fiber reinforced cementitious composites, *Electromagnetic Shielding and Absorption Properties* 27(1): 172–176.

Zhdanok, S. A.; Khrustalev, B. M.; Balyanovskii, E. I.; Leonovich, S. N. 2009. Nanotechnologies in the constructional material science: reality and perspectives, *Vestnik Belarusian Technical University* 3: 5–22.

Батраков, В. Г. 1990. *Изменения бетонов*. Теория и практика. Москва: 400 с.

Мартиненко, В. А.; Морозова, Н. В. 2009. *Специалиста лаборатории завода по производству газобетонных изделий*. Справочник. Днепропетровск: ПГАСА. 310 с.

---

## Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

### Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Laukaitis, A.; Kerienė, J.; Kligys, M.; Mikulskis, D.; Lekūnaitė, L. 2010. Influence of amorphous nanodispersive SiO<sub>2</sub> additive on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete, *Materials science (Medžiagotyra)* 16(3): 257–263, ISSN 1392-1320. (Thomson ISI Web of Science).

Laukaitis, A.; Kerienė, J.; Kligys, M.; Mikulskis, D.; Lekūnaitė, L. 2012. Influence of mechanically treated carbon fibre additives on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete, *Construction and building materials* 26(1): 362–371, ISSN 0950-0618. (Thomson ISI Web of Science).

Lekūnaitė, L.; Laukaitis, A.; Kligys, M.; Mikulskis, D. 2012. Investigations into parameters of forming mixtures of autoclaved aerated concrete with nanoadditives, *Materials science (Medžiagotyra)* 18(3): 284–289, ISSN 1392-1320. (Thomson ISI Web of Science).

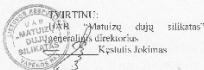
### Straipsniai kituose leidiniuose

Balčiūnas, G.; Lekūnaitė, L.; Laukaitis, A. 2011. SiO<sub>2</sub> mikrodulkių poveikis dujų cementbetonio, su mišria rišamąja medžiaga, stipruminėms savybėms, *14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2011 metų teminės konferencijos „Statyba“ (2011 m. kovo 23–25 d.) straipsnių rinkinys*: 1–4, ISBN 978955289296.



# Priedas

## Autoklavinio aktytojo betono modifikuoto silicio dioksido mikrodulkių priedu bandyminės partijos pagaminimo aktas

  
AUTOKLAVINIO AKTYTOJO BETONO  
MODIFIKUOTO NANODISPERSINIAIS PRIEDAIS,  
BANDYMINĖS PARTIJOS PAGAMINIMO  
AKTAS  
2016-12-06

2016 m. lapkričio 4 dieną, dalyvaujant VGTU Termoiziacijos mokslo instituto mokslininkams (vadovius v.m.ė. M.Siničai), UAB „Mataizų dujų silikatas“ aktytojo betono gamybos linijoje buvo pagaminta AAC elementų su nanodispersiniais priedais bandyminė partija. Šio eksperimento tikslas buvo patikrinti laboratorinių tyrimų rezultatu prielaidų galimybę gamybos sąlygomis. Nanodispersinį priedą sudarė  $SiO_2$  mikrodulkės su 92-98 %  $SiO_2$  mikrodulkių kiekio ir miltos suklefatos AAC gamybos atliekos.

Laboratorinėmis sąlygomis paruoštas amorfio nanodispersinio priedo vandeninis tirpalas, kuris mechaniniu būdu buvo disperguojamas ir pilamas į mataviklę su formavimo mišiniu. Štai pat suformuotos 4 gamybinės formos (po 6 m<sup>3</sup>) buvo supakuotos ir suklefatos autoklave.

Nustatyta, kad gamybiniu būdu gautas nanodispersinio priedo padidėjo 13 % (nuo 3,04 iki 3,44 MPa), lenkimo stipris padidėjo 128 % (nuo 0,46 iki 1,05 MPa).

Manoma, kad tyrimas reikėtų tęsti. Gamybinėmis sąlygomis galima pasiekti laboratorinių bandymų metu gautas AAC bandinių fizikinius ir mechaninius rodiklius, t.y. grūdėtąjį stiprį padidinti iki 4 MPa (30% daugiau nei gauta bandyminiuose pavyksuose). Tam tikslui reikia pakeičiant AAC gamybos technologiją įrengiant nanodispersinių priedų disperguojimą ir dozavimą į formavimo mišinio mataviklę.

UAB „Mataizų dujų silikatas“  
Gamybos direktorius  
 Vytautas Čemuskas

VGTU Termoiziacijos mokslo instituto  
V. m.ė.  
 Marijonas Siničas

Lina Lekūnaitė

KALCIO HIDROSILIKATŲ SUSIDARYMĄ INTENSIVINANČIŲ PRIEDŲ POVEIKIS  
AUTOKLAVINIO AKYTOJO BETONO FORMAVIMO MIŠINIŲ IR PRODUKTŲ  
SAVYBĖMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
medžiagų inžinerija (08T)

Lina Lekūnaitė

INFLUENCE OF ADDITIVES INTENSIFYING FORMATION OF THE CALCIUM  
HIDROSILICATES ON PROPERTIES OF THE FORMING MIXTURES AND  
PRODUCTS PARAMETERS OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Materials Engineering (08T)

2013 05 10. 8,25 sp. I. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino UAB „Ciklonas“  
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius