

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomaš VELISEIČIK

AUTOKLAVINIO FIBROCEMENTO
KOMPOZITO KŪRIMAS IR JO SAVYBIŲ
TYRIMAI STANDARTINIO GAISRO
TEMPERATŪROS APLINKOJE

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (T 008)

Vilnius, 2024

Disertacija rengta 2018–2024 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Ramunė ŽURAUSKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008).

Konsultantas

dr. Modestas KLIGYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

dr. Ina PUNDIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008).

Nariai:

dr. Giedrius BALČIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008),

habil. dr. Jacek KATZER (Varmijos ir Mozūrijos universitetas Olštynė, Lenkija, Statybos inžinerija – T 002),

prof. dr. Džigita NAGROCKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Medžiagų inžinerija – T 008),

prof. dr. Danutė VAIČIUKYNIENĖ (Kauno technologijos universitetas, Statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2024 m. birželio 13 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto SRA-I posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2024 m. gegužės 10 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto talpykloje <https://etalpykla.vilniustech.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2024-034-M mokslo literatūros knyga

<https://doi.org/10.20334/2024-034-M>

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2024

© Tomaš Veliseičik, 2024

tomas.veliseicik@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tomaš VELISEIČIK

DEVELOPMENT OF AUTOCLAVE FIBRE
CEMENT COMPOSITE AND
INVESTIGATION OF ITS PROPERTIES
UNDER STANDARD FIRE CONDITIONS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (T 008)

Vilnius, 2024

The doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2018–2024.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Ramunė ŽURAUSKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

Consultant

Dr Modestas KLIGYS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

The Dissertation Defence Council of the Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairperson

Dr Ina PUNDIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

Members:

Dr Giedrius BALČIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Dr Habil. Jacek KATZER (University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland, Civil Engineering – T 002),

Prof. Dr Džigita NAGROCKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Prof. Dr Danutė VAIČIUKYNIENĖ (Kaunas University of Technology, Civil Engineering – T 002).

This dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of the Scientific Field of Materials Engineering in the SRA-I Meeting Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a.m. on 13 June 2024**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intended defence of the dissertation was sent on 10 May 2024. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Vilnius Gediminas Technical University repository <https://etalpykla.vilniustech.lt> and the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje tiriamos atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, ir anglies pluošto panaudojimo galimybės, kuriant autoklavinio fibrocemento kompozitą. Disertacijos tikslas – padidinti autoklavinio fibrocemento kompozito mechaninį atsparumą naudojant atliekas, susidarančias gaminant putstiklio granules, ar anglies plaušo priedus, ir įvertinti standartinio gaisro temperatūros (iki 841 °C) poveikį jo mechaninėms savybėms.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniam skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pateikti disertacijos tema autoriaus pranešimai konferencijose, paskelbtos publikacijos ir disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas mokslinės literatūros apžvalgai ir analizei. Jame nagrinėjamas autoklavinio fibrocemento hidratacijos procesas. Apžvelgiamas aukštos temperatūros poveikis cementinėms medžiagoms ir priedų panaudojimas siekiant padidinti jų atsparumą aukštai temperatūrai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje yra aprašytos darbe naudojamos žaliavos, jų charakteristikos ir savybės. Taip pat pateikta autoklavinio fibrocemento kompozito mišinių sudėtis, tyrimo metodai ir naudota įranga.

Trečiajame skyriuje pateikiami autoklavinio fibrocemento su atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, ir atskirai su anglies pluošto priedais poveikio mikro- ir makrostruktūroms, fizikinėms ir mechaninėms savybėms rezultatai. Nagrinėjama, kaip pasikeičia kompozito su panaudotais priedais mikro- ir makrostruktūros, fizikinės ir mechaninės savybės po standartinio gaisro temperatūros poveikio. Nustatyta modifikuotojo kompozito degumo klasė ir atsparumas ugniai. Pateikiamos trečiojo skyriaus išvados, o po skyriaus – bendrosios disertacijos išvados.

Disertacijoje aprašyti tyrimų rezultatai paskelbti trijuose moksliniuose straipsniuose žurnaluose įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę ir pristatyti trijose nacionalinėse ir tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

Abstract

The dissertation examines the possibilities of using the waste generated during the production of blowing agent granules and carbon fibres in the development of autoclaved fibre cement composite. The dissertation aims to increase the mechanical resistance of the autoclaved fibre cement composite using the expanded glass granules producing waste or carbon fibre additives and to evaluate the effects of standard fire temperature (up to 841 °C) on its mechanical properties.

The dissertation comprises an introduction, three chapters, a result conclusion, references and a list of the author's publications on the dissertation topic.

The introduction chapter discusses the researched problem, relevance of this work, research object, work goal and formulated exercises, the research methodology, scientific recency, practical meaning of work results, and the defended statement. The introduction closes with a list of the author's presentations at conferences on the dissertation topic, a list of published publications, and the dissertation structure.

The first chapter is dedicated to the overview and analysis of scientific literature. It reviews the effects of high temperatures on cementitious materials and the use of additives to increase their resistance to high temperatures. At the end of the chapter, conclusions are formulated, and the tasks of the dissertation are clarified.

The second chapter describes the raw materials used in the work, their characteristics and their properties. It also provides information on the composition of autoclaved fibre cement composite mixture, research methods, and equipment used.

The third chapter presents the results of the micro- and macro-structure, physical and mechanical properties of autoclaved fibre cement with waste generated during the production of blowing agent granules and separately with carbon fibre additives. It analyses how the micro- and macro-structure, as well as the physical and mechanical properties of the composite with the used additives, change after exposure to the standard fire temperature. The reaction to fire class and fire resistance of the modified composite has been determined. The chapter closes with conclusions. Finally, general conclusions are presented.

The research results described in the dissertation were published in three scientific publications in journals that are included in the *Clarivate Analytics Web of Science* database and presented at three national and international scientific conferences.

Žymėjimai

Simboliai

A_c – bandinio skerspjūvio plotas, mm²;
 A_f – degančiojo objekto paviršiaus plotas, m²;
 b – bandinio plotis, mm;
 F – didžiausia gniuždymo apkrova, N;
 f_c – gniuždymo stipris, MPa;
 f_{cf} – lenkimo stipris, MPa;
 h – bandinio aukštis, mm;
 l – bandinio ilgis tarp keitiklių, m;
 m – išdžiovintojo bandinio masė, g;
 m'' – masės išdegimo greitis, g/m²s;
 t – laikas, s;
 Q_c – gaisro šilumos energija, W;
 V – bandinio tūris, mm³;
 v – ultragarso impulso sklidimo greitis, m/s;
 W_i – ilgalaikis vandens įmirkis, %;

ΔH_c – lakiųjų produktų degimo šiluma, kJ/g;

θ_g – gaisro metu esanti temperatūra, °C;

$\rho_{orasausis}$ – orasausis tankis, kg/m³;

χ – išdegimo koeficientas.

Santrumpos

AF – autoklavinis fibrocementas (angl. *Autoclaved fibre cement*);

AFK – autoklavinis fibrocemento kompozitas (angl. *Autoclaved fibre cement composite*);

Al(OH)₃ – aliuminio hidroksidas (angl. *Aluminium hydroxide*);

AP – anglies pluoštas (angl. *Carbon fibre*);

AS₂ – metakaolinas;

CASH – kalcio aliuminio silikato hidratas;

C₃A – trikalcio aliuminatas;

C₃S – trikalcio silikatas;

CSH – kalcio silikato hidratas (angl. *Calcium silicate hydrate*);

DTG – diferencinė termogravimetrinė analizė (angl. *Differential thermal analysis*);

OM – optinė mikroskopija (angl. *Optical microscopy*);

SEM – elektroninė skenuojamoji mikroskopija (angl. *Scanning electron microscope*);

PGA – atlieka, susidaranti gaminant putstiklio granules (angl. *Expanded glass granules producing waste*);

PCS – visuminė sudegimo šiluma;

TGA – termogravimetrinė analizė (angl. *Thermogravimetric analysis*);

UIG – ultragarso impulso sklidimo greitis (angl. *Ultrasound pulse velocity*);

V/C – vandens ir cemento santykis;

XRD – rentgeno spindulių difrakcija (angl. *X-ray diffraction*).

Sąvokos

Aukšta temperatūra – temperatūra, kuri susidaro išplitusio standartinio gaisro stadijoje (angl. *High temperature – the temperature that occurs in the stage of a widespread standard fire*).

Fasado gaisras – gaisras, kuris kyla pastato viduje ar išorėje, tačiau dėl degių fasado medžiagų išplinta pastato išorėje (angl. *Facade fire – a fire that starts inside or outside a building, but spreads outside the building due to combustible facade materials*).

Fibrocementas – fibromis sustiprintas cementinis kompozitas, gaminamas iš smulkiųjų užpildų ir rišiklio, ir suketintas naudojant hidrotermines sąlygas (angl. *Fibre cement – a*

fibre-reinforced cement composite made from fine aggregates and a binder, and hardened using hydrothermal conditions).

Gaisro galia – šilumos (energijos) kiekis, sukurtas gaisro plitimo metu (angl. *Fire power – amount of heat (energy) created during fire spread*).

Gaisro plitimo stadija – gaisro stadija, kai jo plitimo metu auga šilumos išskyrimo sparta ir temperatūra (angl. *Fire spread stage – the fire stage, when the rate of heat release and temperature increase during its spread*).

Kompozitas – mažiausiai dviejų medžiagų derinys, kur pirmoji – matrica, o antroji – dispersinė fazė (angl. *Composite – a combination of at least two materials, where the first is the matrix and the second is the dispersed phase*).

Plaušas – pluošto skaidula (angl. *Splint – a thread or filament from which a vegetable tissue, mineral substance, or textile is formed*).

Pluoštas – plaušų sanauka, darinys (angl. *Fibre – dietary material containing substances such as cellulose, lignin, and pectin, that are resistant to the action of digestive enzymes*).

Standartinio gaisro kreivė – gaisro metu temperatūros kitimo sparta laiko atžvilgiu pagal LST EN 1991-1-2:2004 standarte apibrėžtas sąlygas (angl. *Standard fire curve – the rate of temperature change during a fire in relation to time according to the conditions defined in the LST EN 1991-1-2:2004 standard*).

Standartinio gaisro temperatūra – 841 °C temperatūra nuo gaisro pradžios po 30 min (angl. *Standard fire temperature - 841 °C after 30 minutes from the start of the fire*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika.....	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
 1. FIBROCEMENTINĖS MEDŽIAGOS IR JŲ ELGSENA AUKŠTOJE TEMPERATŪROJE	 7
1.1. Fibrocemento gaminiai ir jų panaudojimas	7
1.2. Gaisro sukeltas temperatūros poveikis statinio konstrukcijoms	9
1.3. Autoklavinio fibrocementa gamyba	11
1.4. Autoklavinio fibrocementa struktūros formavimas	12

1.4.1. Autoklavinio fibrocemento struktūros formavimas iki hidroterminio kietinimo.....	12
1.4.2. Autoklavinio fibrocemento struktūros formavimas hidroterminio kietinimo metu.....	15
1.5. Autoklavinio fibrocemento elgsena aukštoje temperatūroje	18
1.5.1. Autoklavinio fibrocemento cemento sukiėtėjusios cementinės matricos elgsena aukštoje temperatūroje.....	19
1.5.2 Autoklaviniam fibrocementui panaudotų užpildų elgsena aukštoje temperatūroje.....	20
1.5.3. Autoklaviniam fibrocementui panaudotų armavimo priedų elgsena aukštoje temperatūroje	22
1.5.4. Autoklaviniame fibrocemente esančio vandens elgsena aukštoje temperatūroje.....	24
1.6. Autoklavinio fibrocemento atsparumo aukštomis temperatūroms padidinimo būdai	24
1.6.1. Metakaulino medžiagos panaudojimas cementinėse medžiagose	26
1.6.2. Anglies plaušo panaudojimas cementinėse medžiagose.....	28
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	30
 2. ŽALIAVOS, TYRIMŲ METODIKOS IR AUTOKLAVINIO FIBROCEMENTO KOMPOZITO MIŠINIŲ SUDĖTIS.....	33
2.1. Naudotos žaliavos	33
2.1.1. Portlandcementis	34
2.1.2. Kvarcinis smėlis	36
2.1.3. Atlieka, susidaranti gaminant putstiklio granules.....	37
2.1.4. Celiuliozės pluoštas	39
2.1.5. Anglies plaušas.....	41
2.1.6. Kiti priedai.....	42
2.2. Autoklavinio fibrocemento kompozito bandinių formavimas.....	44
2.3. Standartinio gaisro temperatūros sąlygos	46
2.4. Tyrimų metodikos	47
2.5. Antrojo skyriaus išvados	52
 3. AUTOKLAVINIO FIBROCEMENTO KOMPOZITO STRUKTŪROS, FIZIKINIŲ IR MECHANINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI	55
3.1. Autoklavinio fibrocemento tyrimai	56
3.2. Atliekos, susidaranti gaminant putstiklio granules, poveikis autoklavinio fibrocemento savybėms iki standartinio gaisro temperatūros poveikio	60
3.2.1. Tankio tyrimai	61
3.2.2. Ultragarso impulso sklaidimo greičio tyrimai	62
3.2.3. Ilgalaikio vandens įgėrio tyrimai	63
3.2.4. Makro- ir mikrostruktūros tyrimai.....	64
3.2.5. Terminės analizės tyrimai.....	67
3.2.6. Mechaninių savybių tyrimai	70

3.3. Atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, poveikis autoklavinio fibrocemento savybėms po standartinio gaisro temperatūros poveikio	72
3.3.1. Tankio tyrimai po standartinio gaisro poveikio.....	72
3.3.2. Ultragarso impulso sklaidimo greičio tyrimai po standartinio gaisro poveikio	73
3.3.3. Ilgalaikio vandens įgėrio tyrimai po standartinio gaisro poveikio.....	74
3.2.4. Makro- ir mikrostruktūros tyrimai po standartinio gaisro poveikio	75
3.2.5. Mechaninių savybių tyrimai po standartinio gaisro poveikio.....	77
3.4. Anglies plaušo poveikis autoklavinio fibrocemento savybėms iki standartinio gaisro temperatūros poveikio	78
3.4.1. Tankio tyrimai	79
3.4.2. Ultragarso impulso sklaidimo greičio tyrimai	80
3.4.3. Ilgalaikio vandens įgėrio tyrimai	81
3.4.4. Mikro- ir makrostruktūros tyrimai.....	81
3.2.5. Mechaninių savybių tyrimai	83
3.5. Anglies plaušo poveikis autoklavinio fibrocemento savybėms po standartinio gaisro temperatūros poveikio	85
3.5.1. Tankio tyrimai po standartinio gaisro poveikio.....	86
3.5.2. Ultragarso impulso sklaidimo greičio tyrimai po standartinio gaisro poveikio	86
3.5.3. Ilgalaikio vandens įgėrio tyrimai po standartinio gaisro poveikio.....	87
3.5.4. Mikro- ir makrostruktūros tyrimai.....	88
3.5.5. Mechaninių savybių tyrimai po standartinio gaisro poveikio	91
3.6. Autoklavinio fibrocemento kompozito su priedais mechaninių savybių apibendrinimas	93
3.7. Regresinės analizės rezultatai.....	94
3.8. Sukurto autoklavinio fibrocemento kompozito degumo klasės nustatymas.....	96
3.9. Sukurto autoklavinio fibrocemento kompozito atsparumo ugniai nustatymas	97
3.10 Trečiojo skyriaus išvados	99
BENDROSIOS IŠVADOS	103
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	105
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS..	117
SUMMARY IN ENGLISH.....	119

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the dissertation	2
Research object	2
Aim of the dissertation	3
Objective the dissertation	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the dissertation	4
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	5
Approval of the research findings	5
Structure of the dissertation.....	5
1. FIBRE CEMENTITIOUS MATERIALS AND THEIR BEHAVIOUR IN HIGH TEMPERATURE.	7
1.1. Fibre cement products and their usage	7
1.2. Temperature effect caused by fire to building constructions.....	9
1.3. Autoclaved fibre cement production	11
1.4. Autoclaved fibre cement structure formation.....	12
1.4.1. Autoclaved fibre cement structure formation up to hydrothermal hardening	12
1.4.2. Autoclaved fibre cement structure formation during hydrothermal hardening	15

1.5. Autoclaved fibre cement behaviour in high temperatures	18
1.5.1. Autoclaved fibre cement hardened cement matrix behaviour in high temperatures	19
1.5.2. Additive used for autoclaved fibre cement behaviour in high temperatures	20
1.5.3. Reinforcement additive used in autoclaved fibre cement behaviour in high temperatures	22
1.5.4. Water present in autoclaved fibre cement behaviour in high temperatures	24
1.6. Methods increasing autoclaved fibre cement resistance to high temperatures	24
1.6.1. Use of metakaolin material in cementitious materials.....	26
1.6.2. Use of carbon fibre in cementitious materials	28
1.7. Conclusions of the First Chapter and formulation of the dissertation tasks	30
 2. RAW MATERIALS, RESEARCH METHODOLOGY, AND AUTOCLAVED FIBRE CEMENT COMPOSITE MIXTURE COMPOSITION	33
2.1. Used raw materials	33
2.1.1. Portland cement.....	34
2.1.2. Quartz sand.....	36
2.1.3. Expanded glass granule production waste.....	37
2.1.4. Cellulose fibre	39
2.1.5. Carbon fibre.....	41
2.1.6. Other additives	42
2.2. Autoclaved fibre cement composite sample formation.....	44
2.3. Standard fire temperature conditions.....	46
2.4. Research methodology.....	47
2.5. Conclusions of the Second Chapter.....	52
 3. RESEARCH ON THE STRUCTURE AS WELL AS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF AUTOCLAVED FIBRE CEMENT COMPOSITE	55
3.1. Autoclaved fibre cement research	56
3.2. Effect of expanded glass granule production waste on autoclaved fibre cement composite properties up to the standard fire temperature effect.....	60
3.2.1. Density research	61
3.2.2. Ultrasound pulse velocity research.....	62
3.2.3. Long-term water absorption research	63
3.2.4. Macro and microstructure research	64
3.2.5. Thermal analysis research	67
3.2.6. Mechanical property research.....	70
3.3. Effect of the expanded glass granule production waste on autoclaved fibre cement composite properties after the standard fire temperature effect	72
3.3.1. Density research after the standard fire effect	72
3.3.2. Ultrasound pulse velocity research after the standard fire effect	73

3.3.3. Long-term water absorption research after the standard fire effect	74
3.2.4. Macro- and microstructure research after the standard fire effect	75
3.2.5. Mechanical property research after the standard fire effect	77
3.4. Carbon fibre effect on autoclaved fibre cement composite properties up to the standard fire temperature effect	78
3.4.1. Density research	79
3.4.2. Ultrasound pulse velocity research	80
3.4.3. Long-term water absorption research	81
3.4.4. Micro- and macro-structure research	81
3.4.5. Mechanical property research	83
3.5. Carbon fibre effect on autoclaved fibre cement composite properties after the standard fire temperature effect	85
3.5.1. Density research after the standard fire effect	86
3.5.2. Ultrasound pulse velocity research after the standard fire effect	86
3.5.3. Long-term water absorption research after the standard fire effect	87
3.5.4. Micro- and macro-structure research	88
3.5.5. Mechanical property research after the standard fire effect	91
3.6. Summarisation of mechanical properties of autoclave fibre cement with additives	93
3.7. Regressive analysis results	94
3.8. Determination of development autoclave fibre cement composite reaction to fire class	96
3.8. Determination of development autoclave fibre cement composite resistance to fire	97
3.10. Conclusions of the Third Chapter	99
 GENERAL CONCLUSIONS	 103
REFERENCES	105
 LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	 117
SUMMARY IN ENGLISH	119

Įvadas

Problemos formulavimas

Autoklavinės fibrocementinės medžiagos plačiai naudojamos statinių fasadams įrengti ir pastato vidaus apdailai. Atlikti moksliniai tyrimai rodo, kad jau pirminėje gaisro plitimo stadijoje šios medžiagos suyra. Dėl šios priežasties padidėja gaisro išplitimo į degius fasado termoizoliacinius sluoksnius pavojus, apsunkinami gaisro gesinimo darbai. Gaisro temperatūros poveikiui atsparesnės struktūros formavimuisi cementinėse medžiagose gali būti naudojama atlieka, susidaranti gaminant putstiklio granules. Tačiau nėra aiškus tokios atliekos poveikis autoklavinio fibrocemento kompozito hidratacijos procesui, fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei tokios struktūros elgsenai aukštoje temperatūroje gaisro sąlygomis. Kaip armavimo komponentas autoklavinėse fibrocementinėse medžiagose yra naudojamas celiuliozės pluoštas. Jau pirminėje gaisro plitimo stadijoje ši medžiaga pirolizuoja, ir tai turi įtakos greitam jos suirimui. Anglies plaušas plačiai naudojamas cementinių kompozitinių medžiagų savybėms pagerinti ir užtikrinti jų struktūros atsparumą aukštomis temperatūroms. Tačiau nėra aiškus anglies plaušo poveikis autoklavinio fibrocemento kompozito hidratacijai ir struktūros formavimuisi bei elgsenai aukštoje temperatūroje.

Darbo aktualumas

Fibrocementinės plokštės įprastai naudojamos vėdinamo fasado sistemose, kur, be šių gaminių, dar gali būti ir degių medžiagų (vėjo izoliacinė plėvelė, mediniai montavimo tašai ir kt.). Taip pat jos naudojamos pastato vidaus apdailai.

Pasaulinė statistika rodo, kad 37 % visų gaisrų kyla pastatuose. Viduje išplitęs gaisras pavojingas laikančiosioms konstrukcijoms. Neužtikrinat reikiamos apsaugos nuo gaisro, medinėms laikančiosioms konstrukcijoms, plintant gaisrui, kyla laikymo gebos praradimo pavojus. Be to, dėl tam tikrų gaisro plitimą lemiančių aplinkybių gaisras iš pastato vidaus neretai išplinta į išorę. Žinoma, kad gaisro atveju fibrocemento plokštės apsaugo degiuosius fasado sistemos komponentus nuo užsidegimo tik ribotą laiką, vėliau gaisras išplinta ir pereina į kitus fasado sluoksnius. Tokių gaisrų, ypač aukštuose ir labai aukštuose pastatuose, gesinimas priešgaisrinėms gelbėjimo pajėgomis yra problemiškas.

Šiuo metu fasadinių sistemų gaisriniai bandymai yra standartizuoti ir atliekami pagal LST EN 13823 serijos standartą, naudojant mažą gaisro galią ($30,7 \pm 2$ kW). Kai kurios Europos Sąjungos šalys, išanalizavusios įvykusių gaisrų padarinius, savo šalyse papildomai reglamentavo fasado sistemos gaisrinius bandymus, kuriuose naudojama didesnė gaisro galia (iki 5,5 MW). Atsižvelgiant į besikeičiančią situaciją, galima prognozuoti naujo harmonizuoto fasadų bandymo standarto įsigaliojimą Europos Sąjungoje ir jo perėmimą Lietuvoje. Lietuvos Respublikos valdžios institucijos, siekdamos didesnio tvarumo statybos srityje, numatė medienos ir organinių medžiagų iš atsinaujinančiųjų gamtos išteklių naudojimo skatinimą visuomeniniuose pastatuose (LR Vyriausybės nutarimas). Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamentas koregavo normatyvinius, gaisrinę saugą reglamentuojančius teisės aktus, kuriuose numatė sąlygas naudoti medieną laikančiosioms konstrukcijoms įrengti iki 9 aukštų statiniuose. Įrengiant medienos laikančiąsias konstrukcijas daugiaaukščiuose pastatuose, prireiks papildomos apsaugos nuo gaisro temperatūros poveikio. Autoklavinio fibrocemento plokštės galėtų būti naudojamos kaip apsauginės plokščių sistemos, siekiant apsaugoti medines laikančiąsias konstrukcijas. Todėl autoklavinio fibrocemento medžiagų atveju svarbu parinkti sprendinius, lemiančius atsparesnės gaisro temperatūros poveikiui struktūros formavimą.

Tyrimų objektas

Autoklavinis fibrocemento kompozitas su atlieka, susidaranti gaminant putstiklio granules, ar su anglies plaušo priedais.

Darbo tikslas

Padidinti autoklavino fibrocemento kompozito mechaninį atsparumą naudojant atliekas, susidarančias gaminant putstiklio granules, ar anglies plaušo priedus, ir įvertinti standartinio gaisro temperatūros poveikį jo mechaninėms savybėms.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti standartinio gaisro temperatūros poveikį nemodifikuotojo autoklavinio fibrocemento kompozito makro- ir mikrostruktūrai, fizikinėms bei mechaninėms savybėms.
2. Ištirti autoklavinio fibrocemento kompozito su atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, priedu struktūros formavimąsi, fizikines ir mechanines savybes.
3. Ištirti autoklavinio fibrocemento kompozito su anglies plaušo priedu struktūros formavimąsi, fizikines bei mechanines savybes.
4. Nustatyti autoklavinio fibrocemento kompozito su atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, ar anglies plaušo priedais sudėtį ir savybes, užtikrinančias atsparumą standartinio gaisro temperatūros poveikiui.

Tyrimų metodika

Autoklavinio fibrocemento kompozito ir jo komponentų tyrimams naudoti rentgenografinės, skenuojančiosios elektroninės ir optinės mikroskopijos bei termogravimetrinės analizės metodai.

Pagrindinėms autoklavinio fibrocemento kompozito fizikinėms ir mechaninėms savybėms tirti naudoti gniuždymo bei lenkimo stiprio, ultragarso impulso sklaidimo greičio, tankio ir ilgalaikio vandens įmirkio tyrimo standartiniai metodai.

Gaisro temperatūros poveikis tirtas tūrinio kaitinimo metodu, naudojant standartinio gaisro temperatūros kilimo kreivę.

Autoklavinio fibrocemento kompozito gaisrinės charakteristikos buvo nustatytos pagal LST EN ISO 1716 standartą ir pagal autoriaus patobulinto LST EN ISO 13785-1 standarto reikalavimus.

Darbo mokslinis naujumas

1. Tyrimams naudoti priedai turi skirtingą poveikį autoklavinio fibrocemento kompozito matricos struktūrai, hidratacijai, ir mechaninėms savybėms, nustatytoms po terminio poveikio, atitinkančio standartinio gaisro sąlygas. Šios žinios papildo informaciją apie atliekos, susidarinės gaminant putstiklio granules, ir anglies plaušo priedų poveikį autoklavinių cementinių medžiagų savybėms ir jų pokytį po aukštos temperatūros poveikio.
2. Atliekos, susidarinės gaminant putstiklio granules, panaudojimas sukurtu autoklavinio fibrocemento kompozito sudėtyje lemia aukštai temperatūrai atsparesnio tobermorito su įterptu aliuminiu susidarymą, tolygų porų pasiskirstymą ir tankesnės mikrostruktūros formavimą. Toks kompleksinis poveikis padidina kompozito gniuždymo stiprį ~20 %, lenkimo stiprį apie ~45 % ir padaro kompozitą atsparesnį standartiniam gaisro temperatūros poveikiui.
3. Atliekos, susidarinės gaminant putstiklio granules, naudojimas autoklaviniam fibrocemento kompozite leidžia iki 10 % pakeisti cementą ar visiškai pakeisti maltą kvarcinį smėlį, nesumažinant kompozito mechaninių savybių. Priedo panaudojimas kompozite veikia kaip tobermorito nukleatorius ir sudaro tą patį hidratą kaip ir cementas hidratacijos metu, kuris lemia struktūros mechaninių savybių padidėjimą.
4. Panaudoto anglies plaušo priedas (iki 1 %), keičiant autoklaviniam fibrocemento kompozite celiuliozės pluoštą, įsikomponuoja į mikrostruktūrą, sustiprina esamą celiuliozės plaušo tinklą ir pagerina pagaminto kompozito gniuždymo stiprį ~7 %, o lenkimo stiprį ~15 %.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Autoklavinio fibrocemento kompozite panaudojus atliekos, susidarinės gaminat putstiklio granules, priedą, sukuriamas naujos sudėties kompozitas, kuris yra atsparesnis standartinio gaisro temperatūrai ir galėtų būti naudojamos ne tik fasado, bet ir pastato laikančiąsias konstrukcijas nuo gaisro temperatūros poveikio apsaugančiose sistemose.

Fibrocementinių plokščių gamyboje naudojant atlieką, susidarinę gaminant putstiklio granules, galima sumažinti malto kvarcinio smėlio ir cemento panaudojimą nepabloginus gaminio mechaninių savybių. Dalinis cemento pakeitimas galėtų prisidėti prie CO₂ emisijos mažinimo.

Ginamieji teiginiai

Autoklavinio fibrocemento kompozite iš dalies pakeičiant cementą arba visiškai pakeičiant maltą kvarcinį smėlį atlieka, susidarančią gaminant putstiklio granules, priedu, jis lemia aukštai temperatūrai atsparesnio tobermorito su įterptu aliuminiu susidarymą, tolygų porų pasiskirstymą ir tankesnės mikrostruktūros formavimą, dėl to gerėja pagaminto autoklavinio fibrocemento kompozito mechaninės savybės ir atsparumas standartinio gaisro temperatūros poveikiui.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 3 moksliniai straipsniai recenzuojamuose moksliniuose žurnaluose, turinčiuose cituojamumo rodiklį *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazėje (Veliseicik ir kt., 2020; Veliseicik ir kt., 2022; Veliseicik ir kt., 2023).

Disertacijos tema yra skaityti pranešimai trijose nacionalinėse ir tarptautinėse mokslinėse konferencijose:

- Tarptautinėje konferencijoje „Technological innovation in civil engineering“ (VIPSKILLS), 2019 m., Vilniuje, Lietuvoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „3rd International Fire Safety of Façade“, 2019 m., Paryžiuje, Prancūzijoje;
- Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, 2021 m., Vilniuje, Lietuvoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados, literatūros šaltinių sąrašas ir autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas bei santrauka anglų kalba.

Darbo apimtis – 135 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudota 14 numeruotų formulių, 77 paveikslai ir 20 lentelių. Disertacijoje buvo panaudoti 154 literatūros šaltiniai.

Fibrocementinės medžiagos ir jų elgsena aukštoje temperatūroje

Skyriuje aprašoma AF gamyba ir panaudojimas. Pristatomi gaisro metu susidarantys temperatūriniai režimai ir galimas jų poveikis statinio konstrukcijoms. Nagrinėjamas AF struktūros formavimo procesas. Analizuojama AF komponentų ir susidariusių mineralų terminė destruktija. Pateikiamos AF atsparumo aukštoms temperatūroms didinimo galimybės. Skyriaus tematika paskelbta viena mokslinė publikacija (Veliseicik ir kt., 2020), medžiaga pristatyta dviejose mokslinėse konferencijose.

1.1. Fibrocemento gaminiai ir jų panaudojimas

Kompozitinė medžiaga apibrėžiama kaip mažiausiai dviejų medžiagų derinys. Pagrindinės yra dvi fazės, iš kurių pirmoji fazė vadinama matrica, antroji – dispersine faze (Calister, 2007). Kompozitinės medžiagos charakteristikos apibrėžiamos kaip sudėtinių atskirų fazių savybių funkcija, tačiau dažniausiai reikšmingiausią įtaką daro dispersinė fazė. Fibrocementas yra priskiriamas cemento matricos kompozitų grupei. XIX a. pab. Liudvigas Hatschek išrado asbestinį cementą (Vanėk ir kt., 2024). Jis sumaišė 90 % cemento su 10 % asbesto pluoštu,

įpylė vandens, o formavimo procesą atliko su kartono gamybos technologine įranga. 1900 m. šis technologinis procesas užpatentuotas, o 1903 m. šiai medžiagai suteiktas pavadinimas „Eternit“ (*lot. aeternus* – amžinas). XX a. pr. atrasta, kad asbestiniam fibrocementui gaminti galima vietoje dalies cemento naudoti kvarcinį smėlį. Toks pakeitimas sumažino gamybos sąnaudas, tačiau pareikalavo gaminio kietinimo hidroterminėmis sąlygomis, t. y. autoklave. 1990 m. įrodytas neigiamas asbesto pluošto poveikis žmogaus sveikatai, todėl asbesto pluoštas buvo pakeistas į celiuliozės pluoštą. Nuo 2005 m. Europos Sąjunga oficialiai uždraudė asbesto pluošto naudojimą statybos produktuose dėl kancerogeninių jo savybių. Tačiau ir šiais laikais fibrocementinių produktų sudėtis nuolat tobulinama siekiant optimizuoti gamybos procesą ir sąnaudas, pagerinti jų technines savybes. Dėl savo gerų techninių savybių fibrocementas plačiai naudojamas statybose. Fibrocementinės plokštės naudojamos vidaus sienų apdailai, balkonų ir terasų aptvėrimams įrengti, dūmtraukiams apdengti, stogo pakalimams ir t. t. (Gorzelańczyk ir kt., 2014). Didžiausi fibrocementinių plokščių kiekiai naudojami vėdinamų fasadų sistemoms įrengti naujai statant pastatus ar juos renovuojant.

Vidurio ir Šiaurės Europos regionuose statinių fasado sistemos turi užtikrinti tinkamas termoizoliacines pastato savybes. Tokiems fasadams įrengti naudojamos ir degiosios medžiagos, tam tikrais atvejais ir degiosios termoizoliacinės medžiagos (ETAG 034). Dideli tokių degių medžiagų kiekiai spartina gaisro plitimą pastato išore. Dažniausiai įrengiamos fasadinės sistemos kyla vertikalčiai į viršų, o tai lemia greitesnę ugnies plitimą dėl fizikinių ir gravitacijos dėsnių nei, pavyzdžiui, horizontaliai išsidėsčiusio objekto degimas. Trečioji priežastis, kuri turi įtakos spartesniam vėdinamojo fasado gaisro plitimui – tai oro tarpas, paliekamas konstrukcijai vėdinti. Vertikalčiai įrengtas oro tarpas tarp termoizoliacinės medžiagos ir fasadinės apdailos sukuria izoliuotąją erdvę, kurioje kaupiasi aukštos temperatūros degimo produktai. Susiformavęs oro srautas perneša juos nuo degančiosios zonos į viršų, ten uždegdamas kitas degiąsias medžiagas. Vidaus apdailai naudojami fibrocementiniai produktai dažniausiai nenaudojami deriniuose su degiosiomis medžiagomis, todėl gaisro aplinkybių, kurios artimos vėdinamųjų fasadų atveju, čia nepasitaiko. Fibrocementiniai gaminiai galėtų būti naudojami kaip konstrukcijų atsparumą ugniai didinančios medžiagos (plokščių, tinko ar kitu pavidalu). Visais atvejais fibrocementiniai gaminiai gali būti veikiami gaisro temperatūros, ir jų vientisumo savybės yra svarbios statinio esminiam gaisrinės saugos reikalavimui užtikrinti.

1.2. Gaisro sukeltas temperatūros poveikis statinio konstrukcijoms

Degimas – tai oksidacijos fizikinis-cheminis procesas, kurio metu išsiskiria šiluma, liepsna ir degimo produktai. Šiluma gaisro metu gali būti perduodama trimis būdais: konvekcija, laidumu ir spinduliavimu. Bendruoju atveju gaisro šilumos energija yra apibrėžiama pagal formulę (Draizdeil, 1985):

$$Q_c = \chi m'' A_f \Delta H_c, \quad (1.1)$$

čia χ – išdegimo koeficientas (<1); m'' – masės išdegimo greitis, $\text{g/m}^2\text{s}$; A_f – degančiojo objekto paviršiaus plotas, m^2 ; ΔH_c – lakiųjų produktų degimo šiluma, kJ/g .

Degimo metu tik apie 30 % išskiriamos šilumos sunaudojama degimui palai-kyti, likusi šiluma spinduliavimo ir konvekcijos būdu sklinda į atvirąsias erdves, jose uždegdama degiąsias pastato konstrukcijas. Gaisro temperatūrinis režimas yra sudėtingas procesas, priklausantis nuo degančiosios medžiagos fizikinių ir cheminių savybių bei jos kiekio ir išdėstymo erdvėje, erdvės dydžio ir konfigūracijos, erdvę ribojančių konstrukcijų fizikinių ir cheminių savybių, oro kiekio bei jo srautų, slėgio ir t. t. Daug mokslinių tyrimų ir darbų atlikta nagrinėjant gaisro temperatūrinius režimus įvairiomis aplinkybėmis, kai konkrečioms aplinkybėms buvo nustatomos individualios temperatūrinės gaisro kreivės (natūralaus gaisro kreivė) (Rukavina ir kt., 2017; Kuzyk ir kt., 2020; Ariyanayagam ir Mahendran, 2013; Cantor ir kt., 2022). Tokių gaisrinių bandymų metu gaisro galia būna nuo 30 kW iki 5,5 MW (White ir Delichatsios, 2014). Natūralaus gaisro temperatūrinės kreivės nustatymas, validavimas ir verifikavimas atima daug resursų. Todėl, siekiant standartizuoti gaisro temperatūrinį režimą, yra numatytos standartinės gaisro temperatūrinės kreivės. LST EN 1991-1-2:2004 aprašo tris standartizuotas gaisro kreives: standartinio vidaus gaisro, standartinio išorės gaisro ir standartinio agliavandeninio gaisro. Šių gaisrų temperatūrinio režimo kreivės atitinkamai apibrėžiamos pagal formules (1.2)–(1.4), kuriose $\exp(x)$ laipsnio rodiklis yra bedimensinis:

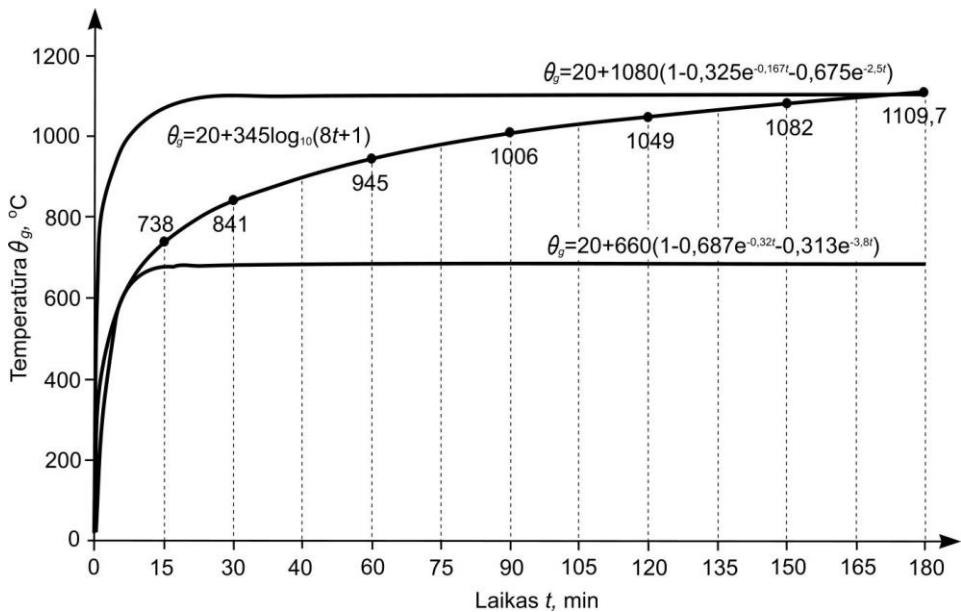
$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1), \quad (1.2)$$

$$\theta_g = 660 (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,31e^{-3,8t}) + 20, \quad (1.3)$$

$$\theta_g = 1080 (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20. \quad (1.4)$$

(1.2)–(1.4) formulėse laikas turi būti pateikiamas minutėmis.

Šių gaisrų temperatūrinių režimų kreivės pavaizduotos 1.1 pav.



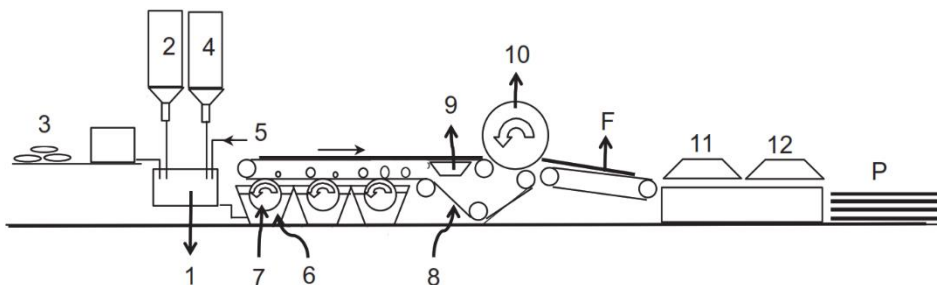
1.1 pav. Standartinės gaisro temperatūros kreivės (LST EN 1991-1-2:2004)

Fig. 1.1. Standard temperature-time fire curves (LST EN 1991-1-2:2004)

Pagal statistiką, 37 % visų gaisrų kyla pastatuose (Brushilinsky ir kt., 2018). Pastate esant įrengtai gaisro aptikimo ir signalizavimo sistemai ar autonominiam dūmų signalizatoriui, gaisras nustatomas per 2 min nuo jo pradžios. Taip pat žinoma, kad Lietuvoje 80 % atvejų ugniagesiai gelbėtojai mieste atvyks į įvykio vietą per 11 min (LR Priešgaisrinės saugos standartas) ir pasiruoš gaisrą gesinti per 2 min (atsižvelgiant į įvykio dydį, gaisro židinio vietą, pastato planinius sprendinius ir kitus taktinius aspektus). Apibendrinus galima teigti, kad pirmieji gesinimo darbai galimi 15 min po gaisro pradžios. Įvertinus natūralių gaisrų temperatūrines kreives ir standartinių gaisro temperatūrinių režimų kreives, matyti, kad 15-tą minutę temperatūra yra aukštesnė nei 650 °C, o kai kuriais atvejais aukštesnė nei 1000 °C. Tokia temperatūra gaisro metu lemia statinio konstrukcijos medžiagų terminę destruktiją, o ši turi įtakos pastato stabilumui, pastovumui bei jame esančių žmonių ir dirbančių ugniagesių gelbėtojų saugai.

1.3. Autoklavinio fibrocemento gamyba

AF gamybai naudojamas cementas, kvarcinis smėlis, celiuliozės pluoštas ir vanduo. Papildomai, priklausomai nuo pageidaujamo AF gaminio techninių charakteristikų, gali būti naudojami įvairūs priedai. AF neturi homogeninės struktūros per visą gaminio storį dėl jo specifinio gamybos proceso, kurio metu panaudojama Hatscheko mašina (1.2. pav.).



1.2 pav. Schematinis tipinio Hatscheko proceso brėžinys (Correia ir kt., 2020):

1 – pulpa, 2 – portlandcementis, 3 – armavimo pluoštas, 4 – kalkmenis, 5 – vanduo, 6 – talpos, 7 – būgnai, 8 – transporterio juosta, 9 – vakuumavimas, 10 – formavimo cilindras, 11 – kirpimas, 12 – formavimas, F – suformuotas lakštas, P – gaminiai

Fig. 1.2. Schematic drawing of the typical Hatschek process (Correia et al., 2020):

1 – slurry, 2 – Portland cement, 3 – reinforcement fibres, 4 – limestone, 5 – water, 6 – vats, 7 – sieve cylinders, 8 – running felt, 9 – vacuum, 10 – formation cylinder, 11 – cut, 12 – shaped, F – formed sheet, P – products

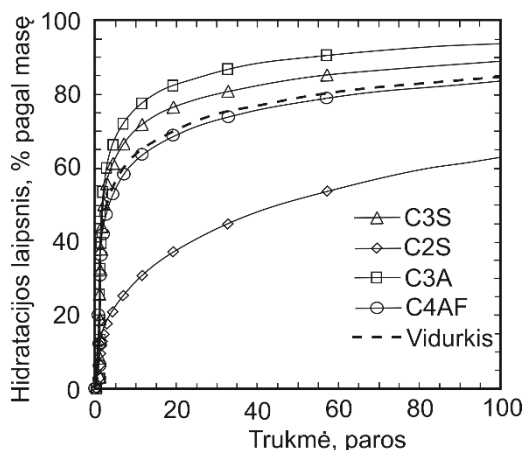
Disertacijoje nagrinėjamas AF plokščių gamybos procesas, kuris prasideda nuo kvarcinio smėlio malimo rutuliniame malūne. Sumaltas smėlis patenka į medžiagų maišymo įrangą. Į šią įrangą patenka ir smulkesnis smėlis (jis atvežamas jau sumaltas). Ten taip pat tiekiamas aliuminio hidroksidas $\text{Al}(\text{OH})_3$ ir į maišymo įrangą patenka kaolinas. Atskiroje technologinėje įrangoje iš dviejų tipų celiuliozės yra paruošiamas armavimo pluoštas. Vieno tipo celiuliozės plaušeliai yra trumpesni, kitos celiuliozės plaušeliai išsiskleidžia į vadinamąją „vėduoklę“. Paruošta vandens ir celiuliozės pulpa maišoma su dozuotais sausaisiais milteliais, papildomai dedama portlandcemenčio. Visa masė maišoma nuo 5 iki 10 min (Athavan ir kt., 2017). Mišinys patenka į Hatscheko mašiną, kuri suformuoja vieną plokštės sluoksnį, kurio storis yra 0,1–0,4 mm. Priklausomai nuo produkto paskirties jį gali sudaryti nuo 3 iki 10 sluoksnių. Pjaustymo įrenginyje dar drėgna minkšta sluoksnių masė supjaustoma į norimo dydžio gabalus. Supjaustyti gabalai sudedami ant metalinių padėklų ir išlaikomi 8 h. Vėliau jie dedami į autoklavus. Autoklave plokštės kietinamos 10–12 h. Autoklave naudojamas 10 atm. Slėgis, išlaikant 120–140 °C temperatūrą.

1.4. Autoklavinio fibrocemento struktūros formavimas

AF struktūros formavimo procese galima išskirti du etapus. Pirmasis – cemento hidratacijos procesas ir kitų AF komponentų tarpusavio reakcijos iki hidroterminio poveikio. Antrasis etapas – struktūros formavimas autoklavinio kietinimo metu. Neabejotinai nežymus AF struktūros formavimas vyksta ir po autoklavinio kietinimo, tačiau tai nėra esminis AF struktūros formavimo etapas, todėl jis nebus apžvelgiamas.

1.4.1. Autoklavinio fibrocemento struktūros formavimas iki hidroterminio kietinimo

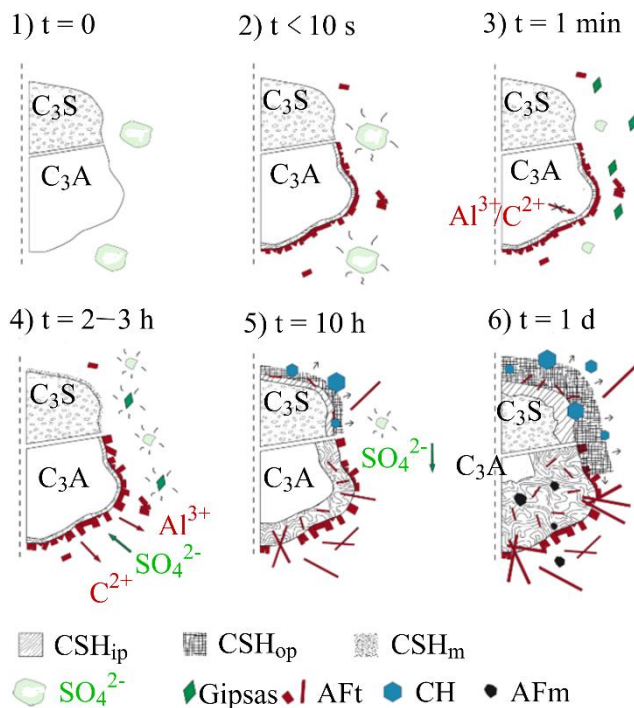
Pirmajame etape, maišant AF komponentus su vandeniu, įvyksta cemento hidratacija. Cemento hidratacijos ir kietėjimo procesas mokslininkų yra detalai aprašytas (Taylor, 1997). Cemento hidratacijai įvertinti yra sukurta nemažai skaičiavimo metodikų, pagal kurias, priklausomai nuo cemento sudėties, galima prognozuoti jo mineralų hidratacijos procesą ir gaunamus hidratacijos produktus. Mokslininkai (Tennis ir Jennings, 2000) suskaičiavo reaguojančiųjų mineralų kiekio priklausomybę nuo kietėjimo laiko, kuri pateikta 1.3 pav. Iš autorių pateiktų rezultatų matyti, kad pirmiausia reaguoja C_3S ir C_3A mineralai.



1.3 pav. Portlandcemenčio mineralų hidratacijos laipsnio priklausomybė nuo kietėjimo laiko (Tennis ir Jennings, 2000)

Fig. 1.3. Dependence on the degree of hydration on the age of Portland cement (Tennis & Jennings, 2000)

Kiti mokslininkai (Fylak ir kt., 2012), naudodami skenuojančios elektroninės kromiografijos tyrimus, *in situ* rentgeno spektrometrijos ir šilumos srauto kalorimetrijos kompleksinius tyrimus, ištyrė portlandcemenčio hidratacijos procesą priklausomai nuo laiko. Nustatyta, kad pirmiausia hidratuoja C_3S ir C_3A cemento mineralai, jų hidratacijos schema pateikta 1.4 pav.

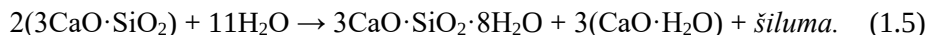


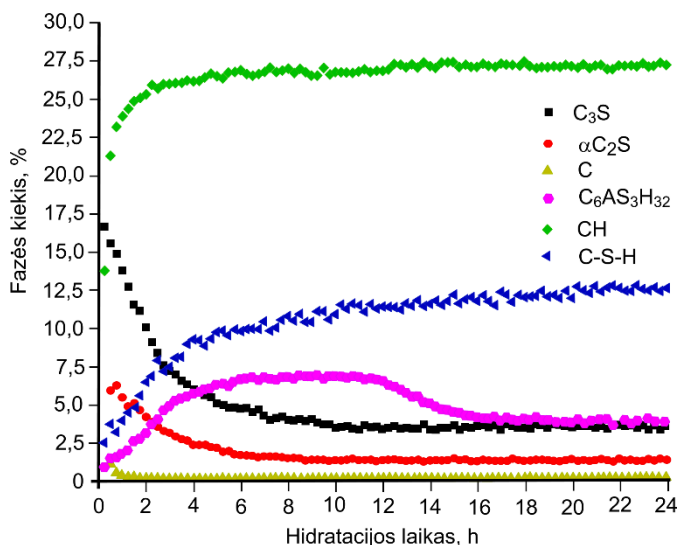
1.4 pav. Portlandcemenčio hidratacijos schema (Fylak ir kt., 2012)

Fig. 1.4. Scheme of Portlandcement hydration (Fylak et al., 2012)

AF atveju būtent šie cemento mineralai sudaro pirminius hidratacijos produktus. Schreiner ir kt. (2018) pateikė autoklavinio akytojo betono hidratų susidarymo priklausomybę nuo hidratacijos laiko, su kuria susipažinus matyti CH, CSH, C_6ASH_{32} susidarymas iki 8-tos kietėjimo valandos (1.5 pav.).

Mokslininkai įvardija, kad C_3S hidratacijos metu susidaro mažai kristališkas CSH ir CH (Tikkanen ir kt., 2014; Oh ir kt., 2012). C_3S hidratuoja sudarydamas hidratacijos produktus atitinkamai pagal (1.5) formulę:





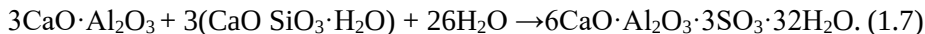
1.5 pav. Hidratų susidarymas autoklavinio aktytojo betono tesloje iki autoklavinio kietinimo (Schreiner ir kt., 2018)

Fig. 1.5. Phase development in autoclaved aerated concrete paste on a laboratory scale before autoclaving (Schreiner et al., 2018)

CSH turi išskirtinę cheminę sudėtį ir besikeičiančią struktūrą. CSH gelyje Ca/S ir H/S santykiai hidratacijos metu kinta kartu su porų tirpalo sudėtimi, pereinat iš vienos metastabilios pusiausvyros į kitą metastabilią pusiausvyrą (Jennings 1986). Gamtoje žinoma daugiau nei 40 CSH, dalis iš jų, turinčios tiek kristalinę, tiek amorfinę struktūrą, gali susidaryti cementinėse sistemose dėl C₃S ir C₂S hidratacijos. Įprastinės portlandcemenčio hidratacijos metu gali susidaryti dvi amorfinio CSH gelio būsenos – CSH(I) ir CSH(II). Tarpusavyje CSH(I) ir CSH(II) skiriasi dėl skirtingo C/S santykio, kuris gali svyruoti tarp 0,7 ir 2. Jų klasikinį skirstymą yra pasiūlęs Tayloras, pagal kurį CSH(I) turi C/S < 1,5, o CSH(II) turi C/S > 1,5 (Taylor, 1997). Tyrėja Donėlienė (2018) savo daktaro disertacijoje mini kitą CSH klasifikavimą, kuris taip pat paremtas C/S molekulių santykiu, tačiau šis santykis turi kitus intervalus, CSH(I) molekulių santykis C/S < 1, o CSH(II) atitinkamai C/S > 1. Bet kokių atveju C/S molekulių santykis, susidarant CSH, turi reikšmingos įtakos galutinėms gaminio savybėms. Susistemintą informaciją apie galinčius susidaryti CSH pateikia Šiaučiūnas ir Baltakys (2011). AF atveju susidaro CSH(I) fazė, kuri tapatinama su tobermoritu (Taylor, 1992). CSH yra vienas iš svarbiausių hidratacijos produktų, kuris sudaro iki 70 % tūrio ir lemia mechanines savybes (Dolando ir kt., 2007).

CH cheminė sudėtis ir kristalografinė struktūra yra pastovi. CH kristalai, kurių dydis 10 μm , turi heksagoninę formą, ir priimta, kad jie neturi esminės reikšmės betono stipriui, o kai kuriais atvejais turi net neigiamą poveikį betono savybėms (Aitcin ir Flatt, 2016).

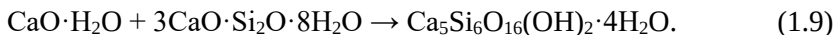
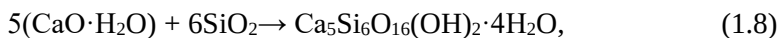
C_3A hidratuoja ir reaguoja su vandeniu, sudarydamas produktus atitinkamai pagal (1.6)–(1.7) formules:



Apibendrinant galima teigti, kad pirminių hidratacijos reakcijų pagrindiniai produktai yra CSH, CH ir $\text{C}_6\text{ASH}_{32}$. Bendruoju atveju suketėjusi cemento tešla savo sudėtyje turi: $\text{C}_6\text{ASH}_{32}$ (15–20 %), CSH hidratų (50–60 %), CH (20–25 %) ir porų (5–6 %) (Kontoleontos ir kt., 2013). AF kompleksinėje sistemoje vyksta ir kitos cheminės reakcijos, tačiau jų poveikis struktūros formavimui pirmajame etape nėra esminis.

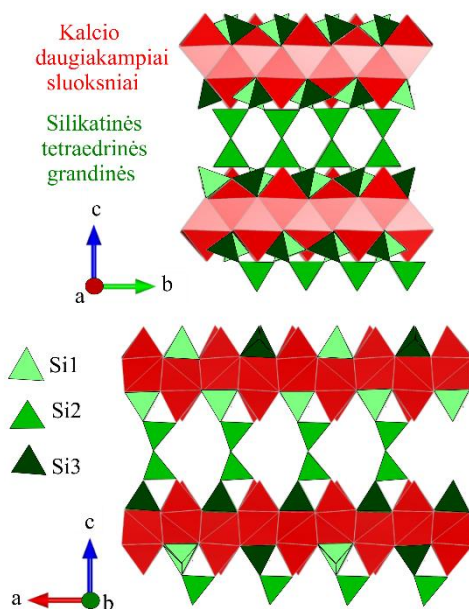
1.4.2. Autoklavinio fibrocementito struktūros formavimas hidroterminio kietinimo metu

AF hidroterminio kietinimo metu papildomai susidaro naujadarai, turintys esminę reikšmę galutinio produkto mechaninėms ir fizikinėms savybėms. C/S santykio mažėjimas gali turėti įtakos didelio kristališkumo fazių susidarymui pridėdant reaktyvaus SiO_2 . Esant nedideliame C/S santykiui, hidroterminio kietinimo metu nuo 120 $^{\circ}\text{C}$ mažo kristališkumo CSH pradeda keistis formuodamas didesnio kristališkumo mineralą, kurio kiekis su laiku didėja. Taigi hidroterminio kietinimo metu mažo kristališkumo CSH keičiasi C/S santykis ir susidaro labiau kristališki ir stabilesni produktai. Šiame etape didelę reikšmę turi maltas kvarcinis smėlis. Reaktyvusis SiO_2 , turintis pucolaninių savybių, reaguoja su CSH ir CH, sudarydamas pagrindinį AF hidroterminio kietinio produktą tobermoritą – (1.8) ir (1.9) formules. Didinant temperatūrą iki 165–385 $^{\circ}\text{C}$, formuojasi dar kristališkesnis mineralas – ksonotlitas (Tan ir kt., 2015).



Susidaręs tobermoritas užpildo poras ir padidina kompozito kompaktiškumą (Ilić ir kt., 2018). Be fasadinių fibrocementinių plokščių, tobermoritas yra pagrindinis susidarantis mineralas ir kitose statybinėse medžiagose, tokiose kaip autoklavinis akytasis betonas, silikatinės plytos ir fasadinės termoizoliacinės plokštės, kurių kietinimas vyksta esant hidroterminėms sąlygoms (Maeshima ir kt., 2003; Chen ir kt., 2017). Tobermoritas priklausomai nuo struktūros gali būti 14 Å, 11 Å,

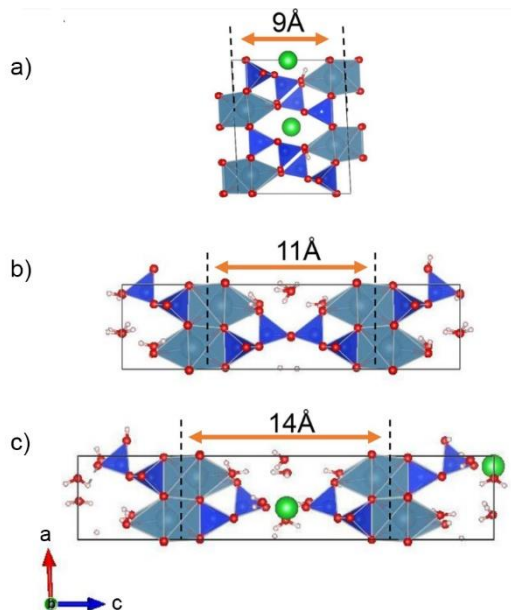
10 Å arba 9 Å, tam tikrais atvejais galima 11 Å fazė su tokiu pat 1,13 nm baziniu atstumu tarp CaO sluoksnių, tačiau skirtingu difrakcijos pėdsaku, kuri vadinama klinotobermoritu (Claringbull ir Hey, 1952, Taylor, 1953, Merlino ir kt., 2000). 14 Å tobermoritas yra dažniausiai sutinkamas hidratacijos produktas ir nuo 11 Å tobermorito skiriasi vandens molekulių skaičiumi tarp sluoksnyje, taip pat ir baziniu atstumu (Viehland ir kt., 2005). Tuo tarpu 11 Å tobermoritas yra pagrindinis hidratacijos produktas, susidarantis kietinant cemento teslą hidroterminėmis sąlygomis, mišinio sudėtyje papildomai panaudojant SiO_2 . 9 Å tobermoritas savo struktūroje neturi kristalinio vandens ir susidaro 11 Å tobermorito polimorfio pokyčio metu veikiant jį aukštesnės temperatūros sąlygomis (Taylor, 1992). 11 Å tobermorito struktūra susideda iš septynių koordinuotų kalcio daugiasluoksnių sluoksnių ir silikatinų tetraedrinių grandinių (1.6 pav.). Išilgai b ašies yra du susijungę tetraedrai, kurių centre yra Si katijonai, šie sujungti su kitu centruotu Si tiltiniu tetraedru (Merlino ir kt., 2001).



1.6 pav. Kalcio daugiakampiai sluoksniai ir silikatinės tetraedrinės grandinės 11 Å tobermorito struktūroje. Si1 ir Si3 – susiporavę tetraedrai, Si2 tiltinis tetraedras (Merlino ir kt., 2001)

Fig. 1.6. Calcium polyhedral layers and silicate tetrahedral chains in 11 Å tobermorite structure. Si1 and Si3 – pairing tetrahedra, Si2 bridging tetrahedra (Merlino et al., 2001)

Apibendrinti tobermorito struktūrų skirtumai ir atstumai tarp CaO polihidronų pateikiami 1.7 pav.



1.7 pav. Tobermorito struktūros skirtumai (Kobayashi ir kt., 2021):

a) 9 Å tobermoritas; b) 11 Å tobermoritas; c) 14 Å tobermoritas

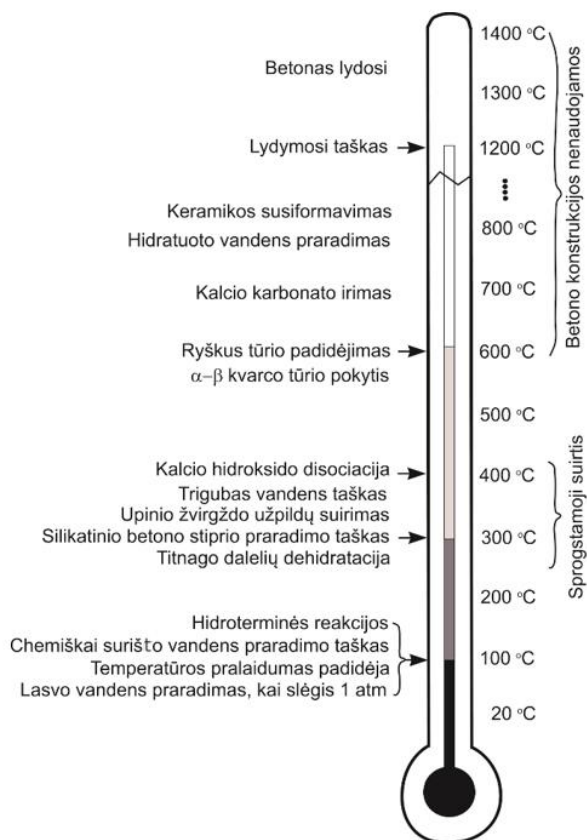
Fig. 1.7. Difference of tobermorite structure (Kobayashi et al., 2021):

a) 9 Å tobermorite; b) 11 Å tobermorite; c) 14 Å tobermorite

Iki hidroterminio kietinimo susidarę C_6ASH_{32} kristalai yra termiškai nestabiliūs ir jų dehidracija įvyksta žemesnėje nei 120 °C temperatūroje (Zhou ir Glasser, 2001; Gabrovšek ir kt., 2008). Mokslininkai terminės analizės metodu ištyrė susintetinto C_6ASH_{32} hidroterminius skilimo procesus ir nustatė trijų pakopų endoterminius fazės virsmus. Pirmoji dehidracija įvyksta didesnėje nei 111 °C temperatūroje, antroji 190 °C temperatūroje, o paskutinis efektas nustatytas 280 °C temperatūroje (Satava ir Veprek, 1975). Dar žinoma, kad C_6ASH_{32} reaguoja su C_3A sudarydamas C_4ASH_{12} (Taylor, 1997). Be to, tyrėjai (Ke ir kt., 2012) nurodo, kad cemento hidratacijos metu susidaręs etringitas C_6ASH_{32} ir kiti hidrograntai esant sudėtyje SiO_2 hidroterminio kietinimo metu taip pat dalyvauja tobermorito susidarymo procese. Autoklavinių fibrocementinių fasadinių plokščių sudėtyje aptikta ir katoito pėdsakų.

1.5. Autoklavinio fibrocementito elgsena aukštoje temperatūroje

Cementinių medžiagų elgseną aukštoje temperatūroje nagrinėjo daugelis mokslininkų. Atlikti tyrimai neišskiria vienos cementinių medžiagų terminės destrukcijos priežasties. Kadangi gaisras yra dinaminis reiškinys, turintis temperatūros priklausomybę nuo laiko, tai atitinkamai dėl gaisro temperatūros poveikio veikiamų medžiagų mikro- ir makrostruktūros kinta laiko bei temperatūros atžvilgiu. Khoury (2000) portlandcemenčių medžiagų fizikinius ir cheminius procesus, vykstančius gaisro metu, vizualiai parodė temperatūros pokyčio atžvilgiu (1.8 pav.).



1.8 pav. Fizikiniai ir cheminiai procesai portlandcemenčio betono kaitinimo metu (Khoury, 2000)

Fig. 1.8 Physicochemical processes in Portland cement concrete during heating (Khoury, 2000)

Nurodyta, kad kylant temperatūrai pirmiausia iš struktūros šalinamas vanduo, taip iki 200 °C gali įvykti įvairios hidroterminės reakcijos, kurių metu šiai temperatūrai nestabilūs hidratatai skyla arba kristalizuojasi. 300–400 °C temperatūros diapazonas priskirtas betono sprogstamajai suirčiai. Esant didesnei nei 600 °C temperatūrai, įvyksta užpildo polimorfinis pokytis, hidratų skilimas, ir ši temperatūra įvardijama kaip netinkama naudoti betoninėms konstrukcijoms.

Autorius Hertz (1982) nurodo, kad ypač stipraus betono sprogstamoji destrukcija, kaitinant bandinius 1 °C/min sparta, įvyko tarp 350–650 °C temperatūroje. Stipraus betono sprogstamoji destrukcija (irtis) buvo nagrinėjama Phan ir Carino (1998), kurie nustatė, kad betono sprogstamoji irtis vyksta esant 200–325 °C temperatūrai. Buvo nustatyta, kad, veikiant aukštomis temperatūroms, betone vyksta sudėtingi fizikocheminiai ir fizikomechaniniai procesai, lemiantys jo destrukciją. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad aukštos temperatūros destrukcinis poveikis betonui dažniausiai yra susijęs su šilumos, įtempių ir drėgmės poveikiu. Lietuvos mokslininkas (Jocius, 2017) savo daktaro disertacijoje išskyrė tris reiškinius, turinčius įtaką jo tirtų betoninių bandinių termininei destrukcijai – tai dehidratacijos procesai, vykstantys cementiniame akmenyje, fizikiniai ir cheminiai procesai, vykstantys betono užpilduose, ir betono sprogstamoji irtis. Lenkijos mokslininkė (Hager, 2013) sistemiškiau ir detaliau įvardija cementinių medžiagų terminės destrukcijos priežastis. Savo darbe ji mini cementinio akmens dehidratacijos procesus, kurie silpnina CSH kontakto zoną, o išsiskyręs vanduo garų pavidalu sukelia papildomus įtempius mikro- ir makrostruktūroje. Minimas ir cementinio akmens bei panaudotų užpildų terminis susitraukimas, kuris taip pat mažina sukibimą mikrostruktūroje ir didina vidinius įtempius. Taip pat kai kurie užpildai, tokie kaip kvarcinis smėlis, pasižymi polimorfiniu pokyčiu tam tikrame temperatūros intervale.

Autoklavinis fibrocemento kompozitas nėra homogeninė medžiaga. Ji savo sudėtyje turi cementinę matricą, smulkiagrūdžių užpildų ir armavimo medžiagų, be to, jo gamybai naudojamas vanduo. Autoklavinio fibrocemento kompozito elgsena gaisro poveikio temperatūroje priklauso nuo šių sudėtinųjų komponentų.

1.5.1. Autoklavinio fibrocemento cemento sukietėjusios cementinės matricos elgsena aukštoje temperatūroje

Autoklaviniam fibrocemento kompozite cementinis akmuo sudarytas iš portlandcemenčio, smulkiagrūdžio kvarcinio smėlio, kaolino, aliuminio hidroksido $\text{Al}(\text{OH})_3$ ir vandens. Ankstesniuose disertacijos skyriuose buvo aprašytas autoklavinio fibrocemento kompozito hidratacijos procesas ir nustatyta, kad dažniausi hidratacijos produktai yra CSH (11 Å tobermoritas), katoitas, hidrograntai ir kiti hidratatai. Nepaisant hidratų skaičiaus, pagrindinis hidratas autoklaviniam fibrocemento kompozite yra CSH.

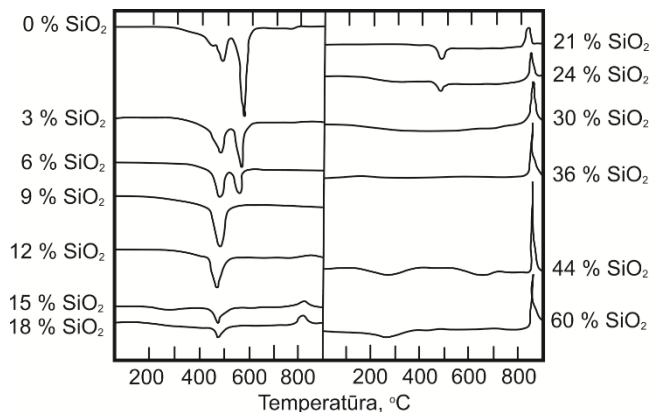
Palyginti su kitais cementiniame akmenyje susidarančiais hidratais, CSH dehidracijos procesas yra sunkiai nustatomas dėl CSH struktūros kompleksiskumo ir kristališkumo. Be to, CSH fazių pasikeitimams nemažą reikšmę turi ir įvairūs prielaidai, kurie gali būti portlandcementio ar kitų sudedamųjų dalių sudėtyje arba papildomai dedami siekiant pagerinti tam tikras galutinio gaminio savybes (Bezerra ir kt., 2011). Nėra atlikta daug tyrimų, nagrinėjančių CSH dehidracijos procesą, ypač natūraliai hidratuotą CSH ir kompleksinę hidratų dehidraciją. Susintetinto CSH dehidracijos modeliai galėtų būti perkeltami natūraliai hidratuotam CSH. Iš esmės CSH dehidracijos mechanizmą paaiškina susintetinto CSH terminio skilimo tyrimai. Tyrėjai (Foley ir kt., 2012) ištyrė susintetinto CSH ($C/S = 1,5$ santykis), terminio skilimo mechanizmą. Naudodami terminės analizės metodus, autoriai nustatė, kad CSH terminis skilimas prasideda nuo $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, antrasis efektas nustatytas $350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrų intervale, galutinis skilimas užfiksuotas tarp $600\text{--}825\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros. Kiti mokslininkai nagrinėjo CSH dehidraciją įvairiomis izoterminėmis sąlygomis (Peng ir kt., 2001). Rezultatai parodė, kad visiškas terminis skilimas nustatytas po 8 h poveikio, esant $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai. Be to, buvo nustatyta, kad pagrindiniai CSH dehidracijos naujadarai buvo $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ir C_3S .

Nagrinėjant konkretesnę autoklavinio fibrocemento hidratą – tobermoritą, galima teigti, kad jo terminio skilimo procesas panašus į prieš tai įvardintą bendrą CSH terminio skilimo modelį. Tobermoritas 73 % stecheometrinio kiekio vandens praranda temperatūros diapazone nuo $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, likusius 27 % – iki $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros (Pourchez ir kt., 2006). Skenuojamoji ir termogravimetrinė analizė, kurią atliko autoriai (Yu ir Kirkpatrick, 1999), parodė panašius rezultatus. Autoriai nustatė, kad esant $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai formuojasi 1,18 nm tobermoritas, kai $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra – 1,11 nm tobermoritas, kai $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra – 0,98 nm tobermoritas. Be abejo, kaitinimo sparta ir kaitinimo režimas taip pat turi įtakos tobermorito dehidracijos procesui (Farmer ir kt., 1966). Apibendrinus daroma išvada, kad yra bendrasis supratimas apie cementinių medžiagų hidratų elgseną aukštoje temperatūroje, tačiau nėra pakankamai žinių apie konkretesnių aplinkybių (pvz., kaitinimo laiko ir spartos) poveikį cementinių medžiagų dehidracijos kinetikai.

1.5.2. Autoklaviniam fibrocementui panaudotų užpildų elgsena aukštoje temperatūroje

Dažnai pasirenkamas kvarcinio smėlio dalelių dydis yra skirtingų frakcijų. Tai daroma tam, kad būtų galima gauti mišinius su kuo mažesniu tuštymėtu, o gauta mikrostruktūra būtų tanki. Schachinger ir kt. (2008) nustatė, kad autoklavinėmis sąlygomis kvarcinis smėlis (SiO_2) pasižymi pucolaninėmis savybėmis ir reaguoja su CH (Ca(OH)_2). Tai paaiškina mažo CH pėdsako buvimą mišiniuose su dideliu

kvarco kiekiu. Ši priklausomybė nustatyta bandymuose ir pateikiama 1.9 pav. (Kalousek, 1952). Nustatyta endoterminio efekto $\sim 500^\circ\text{C}$ temperatūroje mažėjimas, didinat kvarcinio smėlio kiekį bandinyje.

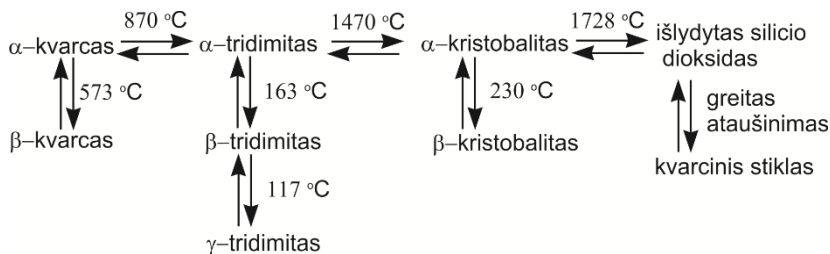


1.9 pav. Cemento ir kvarco mišinio terminės analizės rezultatai (Kalousek, 1952)

Fig. 1.9. Results of thermal analysis of cement-silica mixtures (Kalousek, 1952)

Taigi autoklaviniame fibrocementiniame kompozite dalis kvarcinio smėlio dalyvauja naujų hidratų, tokių kaip CSH ir 11A tobermoritas, susidarymo procese (Isu ir kt., 1995).

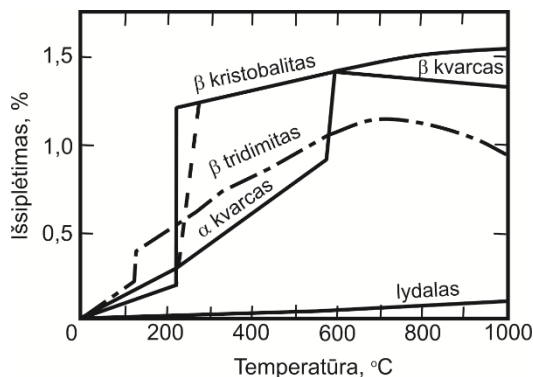
Kvarcinis smėlis, nesudarydamas naujų, naudojamas ir kaip užpildas. Medžiagose, turinčiose procentaliai didelį kvarcinio smėlio kiekį, jis tiesiogiai veikia gaminio atsparumą ugniai. Kvarco polimorfinės fazės ir jų temperatūros pateikiamos 1.10 pav.



1.10 pav. Polimorfiniai kvarco virsmai priklausomai nuo temperatūros (Andreeva, 2011)

Fig. 1.10. Polymorphic transformations of quartz as a function of temperature (Andreeva, 2011)

Perėjimas iš α formos į β formą įvyksta standartinio gaisro temperatūros režimo diapazone ir nulemtas jo tūrio padidėjimo. Kvarco polimorfinių fazių terminis plitimas pateikiamas 1.11 pav.



1.11 pav. Kvarco išsiplėtimo priklausomybė nuo temperatūros (Pereira ir kt., 2014)

Fig 1.11. Expansion of quartz as a function of temperature (Pereira et al., 2014)

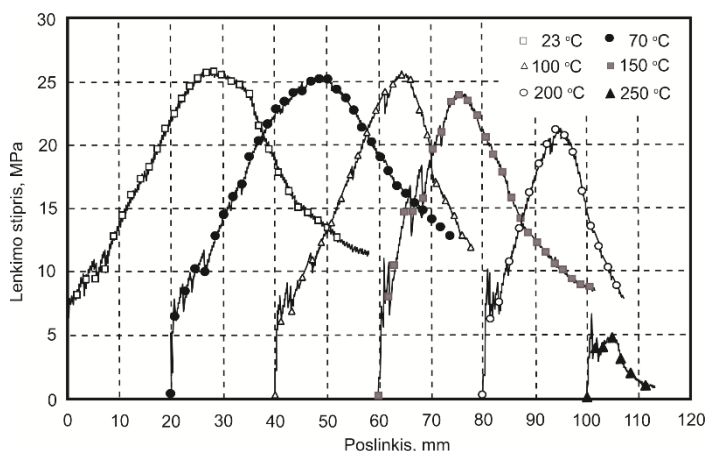
Nurodoma, kad terminio virsmo metu β formos kvarco tūris padidėja 0,85 % (Kosmatka ir kt., 2003). Bendrasis kvarco tūrio padidėjimas yra ~1,5 % (Deltuva ir kt., 1982). Be abejo, toks staigus užpildo tūrio padidėjimas gali lemti papildomus mikro- bei makrostruktūros įtempius ir irtį. Kvarco polimorfinių fazių terminis plitimas pateikiamas 1.11 pav. Nurodoma, kad didžiausi tūrio pokyčiai įvyksta nuo 200 °C iki 600 °C temperatūrose.

1.5.3. Autoklaviniam fibrocementui panaudotų armavimo priedų elgsena aukštoje temperatūroje

Dispersinio armavimo tikslas yra paversti statinių konstrukcinių elementų trapųjį suirimą plastiškesniu ir suvaržyti plyšių vystymąsi. Šiuo metu yra žinoma nemažai skirtingo tipo plaušų iš tokių medžiagų kaip plienas, stiklas, polimerai ir organinės medžiagos (Kaklauskas ir kt., 2012). Dažnai pluoštinis armavimas naudojamas ypač stipraus betono gamyboje. Autoklavinių fibrocementinių plokščių gamyboje naudojamas dviejų tipų celiuliozės pluoštas. Celiuliozė yra pagrindinis medienos ir augalinio pluošto sudedamasis komponentas. Celiuliozė, kurios cheminė formulė $(C_6H_{10}O_5)_n$, netirpsta vandenyje, yra beskonė ir bekvapė, o jos lydymosi temperatūra 260–270 °C (Poletto ir kt., 2015). Fibrocementinių plokščių gamybos metu celiuliozės pluoštas sąveikauja su hidratuotu portlandcemenčiu ir kitais komponentais. Tarp celiuliozės ir cemento matricos susidaro fizikiniai, che-

miniai ir mišrieji ryšiai. Mokslininkai įvardija nemažai natūralaus pluošto privalumų, tarp kurių ekologiškumas, prieinamumas, kaina ir kt. (Martvila ir kt., 2021).

Celiuliozės pluošto pagrindiniai cheminiai komponentai – tai celiuliozė, hemiceliuliozė, ligninas, kartais ir kiti komponentai (vaškas ir pan.). Celiuliozės pluošto terminės destrukcijos metu mažėja polimerizacijos laipsnis ir vyksta sudėtingi pirolizės procesai (Rogovin, 1972). 200 °C temperatūroje įvyksta terminis hemiceliuliozės skilimas, 220 °C temperatūroje – celiuliozės terminis skilimas (Jefimovas, 2015). Veikiant aukštai temperatūrai, celiuliozės plaušo skersmuo mažėja (Zickler ir kt., 2007). Celiuliozės komponentas sudaro cemento hidratų formavimosi centrą, todėl celiuliozės plaušo terminė destrukcija turi įtakos bandinio mikrostruktūrai (Wei ir kt., 2015). Taigi cemento hidratacijos metu susidariusi kontakto zona tarp hidratų ir celiuliozės plaušo destrukтуриzuoja, o išorinių veiksnių poveikis lemia medžiagos struktūros suirimą. Ardanuy ir kt. (2015) pristatė kompozitinių medžiagų lenkimo stiprio sumažėjimą dėl temperatūros poveikio (1.12 pav.).



1.12 pav. Lenkimo stiprio kreivės, gautos veikiant cementinius kompozitus 23 °C, 70 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C ir 250 °C temperatūra (Ardanuy ir kt., 2015)

Fig. 1.12. Flexural curves obtained for cementitious composites to 23 °C, 70 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C and 250 °C (Ardanuy et al., 2015)

Išnagrinėjus lenkimo rezultatus, matomas didesnis lenkimo stiprio sumažėjimas nuo 150 °C. Bandymų metu padidinus temperatūrą iki celiuliozės skilimo temperatūros, matomas lenkimo stiprio sumažėjimas.

1.5.4. Autoklaviniame fibrocemente esančio vandens elgsena aukštoje temperatūroje

AFK gamybai, kaip ir bet kurioms cementinėms medžiagoms, naudojamas vanduo. Be įprasto hidratacijos proceso, kuris vyksta sumaišant cementą su priedais ir užpildais, vyksta ir antrinė dehidratacija autoklavinio kietinimo metu. Gaisro aplinkoje, kai sukeliamas aukšta temperatūra, vanduo pašalinamas iš medžiagos makro- ir mikrostruktūros. Mehta vandens dehidratacijos procesą iš cementinės tešlos klasifikavo pagal vandens būseną (Mehta ir Monteiro, 2014):

Kapiliarinis vanduo – tai vanduo, kuris pasiskirsto didesnėse nei 5 nm porose. Kapiliarinis vanduo nėra veikiamas traukos jėgos, kurią sukuria kietasis paviršius. Knygos autorius taip pat numatė kapiliarinio vandens suskirstymą į pogrupius priklausomai nuo porų skersmens. Porose, kurių dydis yra didesnis kaip 50 nm, vanduo vadinamas laisvuju, ir jo pašalinimo atveju cementinės tešlos tūris iš esmės nesikeičia. Kapiliarinis vanduo esantis porose, kurių dydis tarp 5 nm ir 50 nm, yra laikomas kapiliarų įtempių mažose porose ir jo pašalinimas lemia cementinės tešlos susitraukimą.

Sugertasis vanduo – tai kietojo paviršiaus absorbuotas vanduo, kurį veikia traukos jėgos. Didelė dalis absorbuotojo vandens gali būti pašalinama esant mažesnei nei 30 % santykinės oro drėgmės aplinkai.

Tarpsluoksninis vanduo – tai vanduo, esantis CSH struktūroje. Jam pašalinti reikia aplinkos, kurios santykinė oro drėgmė didesnė nei 11 %.

Chemiškai surištas vanduo – tai hidratų struktūros sudėtinė ir neatsiejama dalis. Šio tipo vandens nepavyksta pašalinti mažinant santykinę oro drėgmę. Tik veikiant aukštai temperatūrai, kai prasideda dehidratacija, hidratai gali skilti ir pašalinti chemiškai surištą vandenį. Pavyzdžiui, tobermorite ar CH vanduo yra chemiškai surištas dėl šių medžiagų kristališkumo.

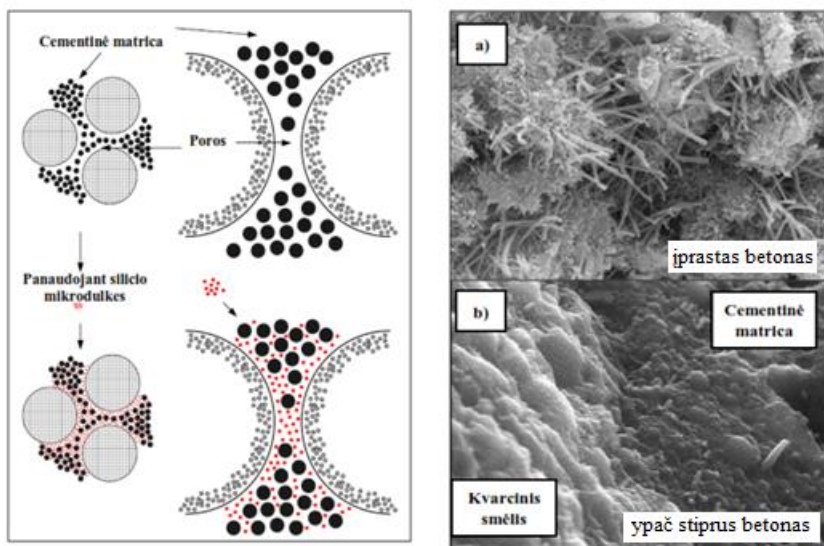
Kapiliarinis, sugertasis ir tarpsluoksninis vanduo yra įvardijamas kaip išgaruojantis vanduo (Powers, 1962). Vandens garavimas prasideda nuo 100 °C, o garavimo metu vyksta terminis jo plėtimasis. Vandens tūris garavimo metu padidėja iki 1700 kartų (Gupta ir kt., 2013). Toks vandens garų plėtimasis sukelia stiprius įtempius cementinės medžiagos struktūroje.

1.6. Autoklavinio fibrocemento atsparumo aukštoms temperatūroms padidavimo būdai

Cementinių medžiagų atsparumui aukštoms temperatūroms didinti nuolat ieškoma sprendimų. Šie sprendimai dažniausiai yra susiję su užpildų, modifikuojančių ir stiprinančių medžiagos struktūrą, bei atsparių aukštoms temperatūroms armavimo medžiagų ir įvairių priedų ar jų derinių naudojimu (Antonovič ir kt.,

2017). Taip pat yra eksperimentuojama parenkant įvairius cementinių medžiagų kietinimo režimus (Peng ir kt., 2018).

Žvelgiant į betonus, jų atsparumas aukštomis temperatūroms gali būti didinamas keičiant rišiklius, užpildus, naudojant priedus ir įmaišas. Siekiant didesnio atsparumo aukštomis temperatūroms, gali būti naudojami pucolaniniai priedai. Pucolanus sudaro silikatinės, aliumosilikatinės ar aluminatinės medžiagos, kurios pasižymi silpnomis cementuojančiomis savybėmis (arba gali neturėti šių savybių). Įprastinės aplinkos temperatūroje, esant drėgmei, šios medžiagos chemiškai reaguoja su kalcio hidroksidu, sudarydamos junginius, kurie pasižymi cementuojančiomis savybėmis ir pagerina sistemos, kurios pagrindą sudaro cementas, stiprumą ir ilgaamžiškumą. Atlikta nemažai įvairių tyrimų, kuriuose pucolaniniai priedai naudojami cementinių medžiagų atsparumo ugniai didinti. Mokslininkas (Lublóy ir kt., 2017) tyrė pucolaninio priedo, lakiųjų pelenų poveikį cementinių medžiagų savybėms aukštoje temperatūroje. Atlikti bandymai parodė, kad betono bandinių terminė destrukcija įvyko esant 400 °C temperatūrai. Vizualiai apžiūrėjus bandinius, jie turėjo matomų terminių įtrūkių. Tuo tarpu bandiniuose, kur buvo panaudoti smulkinti lakieji pelenai ir kvarcinio smėlio užpildas 800 °C temperatūroje, terminių pažeidimų nesimatė. Taip pat tyrėjai ištyrė bandinių mechanines savybes, kurios bandiniuose su pucolaniniu priedu buvo didesnės nei kontroliuose bandiniuose.



1.13 pav. Silicio dioksido (SiO_2) poveikis betonui (Šerelis, 2016)

Fig. 1.13. Impacts of silica fume (SiO_2) (Šerelis, 2016)

Nemažai įvairių tyrimų atlikta naudojant silicio mikrodulkes, kaip pucolaninį priedą betono konstrukcijoms, ir tiriant jų savybes aukštoje temperatūroje. Iš esmės šis ultradispersinis priedas pasižymi geromis pucolaninėmis savybėmis. Jų dydis yra 50–100 kartų mažesnis už cemento dalelių dydį, o cemento hidratacijos metu jos reaguoja su susidariusiu CH ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formuodamos CSH su C/S santykiu 0,9–1,3 (Šerelis, 2016). Silicio dioksido (SiO_2) poveikis mikrostruktūriai pateiktas 1.13 pav.

Tyrėjai (Saad ir kt., 1996) tyrė betono bandinius su 10 %, 20 % ir 30 % silicio dioksido (SiO_2), juos kaitinant iki 600 °C temperatūros. Bandymų rezultatai parodė, kad geriausi rezultatai pasiekti, kai betono bandiniuose buvo 10 % silicio dioksido (SiO_2). Bandiniai su 20 % ir 30 % silicio dioksido (SiO_2) turėjo mažesnius lenkimo stiprio rezultatus, tačiau jų gniuždymo stipris buvo net 28 % didesnis negu kontrolinių bandinių be priedo.

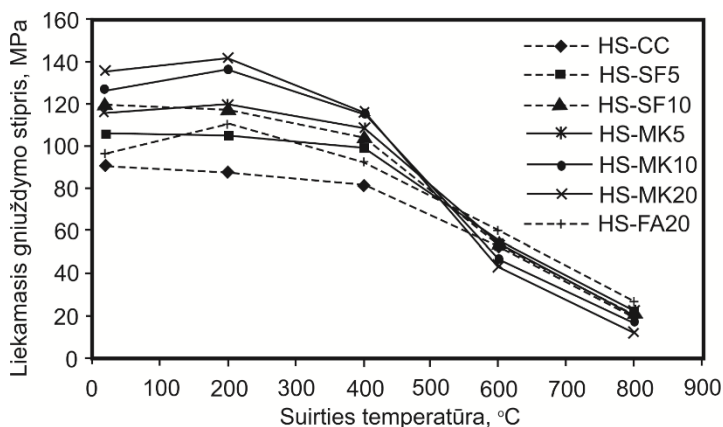
1.6.1. Metakaolino medžiagos panaudojimas cementinėse medžiagose

Metakaolinas (AS_2) yra bevandenė aluminiosilikatinė medžiaga, gaunama termiškai kaitinant kaoliną, su keturgubos koordinacijos struktūra (Chen ir kt., 2016). Kaolino pagrindinė sudedamoji dalis – kaolinitas, kaitinant jį 600–800 °C temperatūroje, dehidratuoja. Dėl kaitinimo kaolinito heksagoninė sluoksninė struktūra yra praktiškai suardoma ir vyksta jo polimorfinis pokytis į amorfinę fazę (Rashad, 2013). Terminės reakcijos trukmė ir temperatūra tiesiogiai daro įtaką AS_2 cheminei sudėčiai ir jo aktyvumui. Kaolinito terminio skilimo cheminė reakcija aprašoma (1.11) lygtimi (Kubiliūtė, 2014):



Dėl nestabilaus Al-O atomų išsidėstymo AS_2 yra reaktyvesnis šarminėje aplinkoje negu kaolinas (Phan ir Carino, 1998). AS_2 pucolaninį poveikį, taip pat ir kompleksinį naudojimą su kitais užpildais, cementinėms medžiagoms ir jų savybės norėję pagerinti mokslininkai nustatė teigiamą jo poveikį galutinėms gaminių savybėms. (Kocak, 2020; Badogiannis ir kt., 2002; Sabir ir kt., 2001; Stonys ir kt., 2013; Barkauskas ir kt., 2022). AS_2 taip pat sėkmingai gali būti naudojamas ir ypač stiprių betonų gamyboje. Optimalus jo (10 %) kiekis užtikrina geriausias bandinių savybes (Phan ir Carino, 1998). AS_2 poveikį bandinių savybėms 800 °C temperatūroje tyrė Poon ir kt. (2003). Mokslininkams panaudojus 5 %, 10 % ir 20 % AS_2 kiekį, buvo suformuoti stipraus ir įprasto betono bandiniai, kurie po 60 parų išlaikymo buvo kaitinami 200 °C, 400 °C, 600 °C ir 800 °C temperatūrose. Šioms temperatūroms pasiekti buvo taikomas 2,5 °C/min temperatūros kėlimo režimas. Pasiekus nustatytą temperatūrą, ji buvo išlaikoma 1 h. Tyrimo rezultatai parodė, kad stipraus betono bandiniuose liekamasis gniuždymo stipris, bandinius

kaitinat iki 400 °C temperatūros, buvo didesnis bandiniuose, kur buvo panaudotas AS₂. Kaitinant žemesnėse temperatūrose, didžiausias liekamasis gniuždymo stipris buvo bandiniuose su 20 % AS₂, o liekamasis stipris atitinkamai mažėjo, mažėjant AS₂ kiekiui. 600 °C ir aukštesnėje temperatūroje stipraus betono bandiniuose su AS₂ liekamasis gniuždymo stipris buvo mažesnis už kontrolinio bandinio rezultatus. Bandinys, kuriame buvo naudotas 5 % AS₂ kiekis, parodė tokius pačius liekamojo gniuždymo stiprio rezultatus kaip ir kontrolinis bandinys (1.14 pav.).

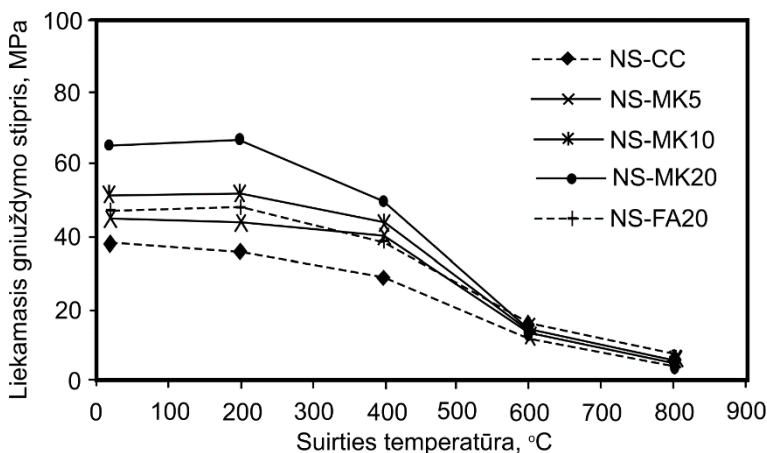


1.14 pav. Stipraus betono liekamasis gniuždymo stipris
(Poon ir kt., 2003)

Fig. 1.14. Residual compressive strength of high-strength concrete
(Poon et al., 2003)

Kitų bandinių serijoje mokslininkai tyrė įprastojo betono bandinių su AS₂ priedu mechanines savybes. Nustatyta, kad liekamojo gniuždymo stiprio rezultatų tendencijos aukštoje temperatūroje buvo panašios, palyginti su stipraus betono bandiniais. Esant 600 °C temperatūrai, bandinių su AS₂ priedu liekamasis gniuždymo stipris buvo panašus į kontrolinių bandinių. Esant 800 °C temperatūrai, kai kuriais atvejais buvo net šiek tiek mažesnis (1.15 pav.).

Mokslinių tyrimų, kuriuose AS₂ naudojamas gaminių savybėms pagerinti autoklavinėse medžiagose, yra mažiau nei betono su šiomis medžiagomis tyrimų. Mokslininkai nustatė, kad kaolino priedai turi teigiamą poveikį autoklavinėms cementinėms medžiagoms, gerėja jų mechaninės savybės, o pucolaninės medžiagos naudojimas leidžia sumažinti cemento kiekį 30–50 % (Ilić ir kt., 2018). Tyrėjas Koutný (Koutný ir kt., 2014), atlikęs tyrimus, nurodė, kad AS₂ autoklavinėse medžiagose veikia kaip tobermorito nukleatorius, kas lemia didesnę tobermorito kiekio susidarymą.



1.15 pav. Įprastojo betono liekamasis gniuždymo stipris (Poon ir kt., 2003)

Fig. 1.15. Residual compressive strength of normal strength concrete (Poon et al., 2003)

Tyrėjas Klimesh (Klimesh ir Ray, 1997) nustatė panašias AS_2 naudojimo aplinkybes. Savo tiriamajame darbe mokslininkai autokavinėje cementinėje medžiagoje AS_2 keitė cementą ir maltą kvarcinį smėlį įvairiomis dalimis. Tirtose sistemoje nustatyta, kad cemento pakeitimas iki 12 % AS_2 didina tobermorito kiekį, o tai yra tiesiogiai susiję su geresnėmis medžiagos mechaninėmis savybėmis. Tirtose sistemoje AS_2 keičiant maltą kvarcinį smėlį, nustatytas susidariusio katoito padidėjimas.

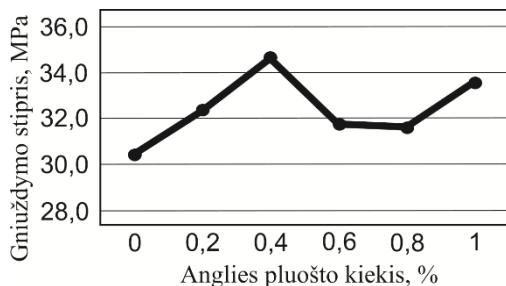
Išanalizavus mokslinę literatūrą, galima daryti išvadą, kad tyrimų, kuriuose būtų vertinamos autoklavinių cementinių medžiagų savybės po gaisro temperatūros poveikio, nėra. Taip pat nėra aiškus AS_2 poveikis autoklavinių cementinių medžiagų savybėms po gaisro temperatūros poveikio.

1.6.2. Anglies plaušo panaudojimas cementinėse medžiagose

Statybinės medžiagos statinyje turi užtikrinti vieną ar kelias funkcijas, dėl to joms keliami tam tikri reikalavimai. Šioje disertacijoje minėta, kad dažnu atveju, siekiant padidinti statybinių medžiagų mechanines savybes, naudojamas dispersinis armavimas. AP plaušo panaudojimas ir tolygus pasiskirstymas cementinėse medžiagose efektyviai padidina šių medžiagų mechanines savybes (Qing ir kt., 2023). Mokslinėje literatūroje nurodyta, kad AP, palyginti su kitais armavimo plaušais, turi didesnę paviršiaus plotą, kraštinių santykį, yra atsparus korozijai, radiacijai ir aukštoms temperatūroms, turi gerą elektros laidumą, yra inertinis magnetiniam laukui, be to, turi didelį stiprį ir aukštą tampros modulį (Jungo modulis) (Bradley, 2016).

Mokslininkai (Liu ir kt., 2018) ištyrė betoninių bandinių gniuždymo stiprio priklausomybę nuo naudoto AP plaušo kiekio. Mokslininkai nustatė, kad 0,4 % ir 1 % AP bandiniuose labiausiai padidina bandinių gniuždymo stiprį. Taip pat bet koks kitas AP kiekio naudojimas iki 1 % bandiniuose turėjo teigiamą poveikį gniuždymo stiprio rezultatams (1.16 pav.).

Tyrėja Lekūnaitė (Lekūnaitė, 2013) savo daktaro disertacijoje tyrė AP poveikį autoklaviniam akytajam betonui. Atlikusi bandinių fizikinių ir mechaninių savybių tyrimus, mokslininkė nustatė, kad smulkiai maltas (AP) su suaktyvintu paviršiumi turi teigiamą poveikį autoklavinio akytojo betono savybėms. Nustatyta, kad hidroterminio autoklavinio akytojo betono kietėjimo metu susmulkintos AP dalelės atlieka kristalizacijos centrų vaidmenį, apauga adatėlių formos CSH, o tai užtikrina jų gerą sąlytį su porų sienelėmis. Dėl šių priežasčių autoklavinio akytojo betono gniuždymo stipris padidėja iki 20 %, o lenkimo stipris – iki 8 %.



1.16 pav. Betoninių bandinių gniuždymo stiprio priklausomybė nuo AP kiekio (Liu ir kt., 2018)

Fig. 1.16. Relationship between carbon mixing amount and compressive strength of concrete (Liu et al., 2018)

Moksliniuose tyrimuose, kuriuose tiriamasis objektas buvo autoklavinė cementinė medžiaga, tyrėjai nustatė, kad AP gerina bandinių šilumos laidumą, nuo kurio priklauso ir terminis medžiagos atsparumas. Taip pat šie tyrimai parodė, kad AP gerina bandinių gniuždymo stiprį (Pehlivanli ir kt., 2016).

Mokslininkai (Guo ir kt., 2021) tyrinėjo CF dalelių ilgio ir jų kiekio įtaką medžiagų mechaninėms savybėms, veikiant aukštomis 400 °C ir 800 °C temperatūroms. Svarbu, kad šiame tyrime mokslininkai parinko temperatūros režimą pagal ISO 834-1 standartą, kas simuliuoja gaisro sukeltą temperatūros režimą. Aukštos temperatūros poveikio tyrimai buvo suplanuoti trimis etapais, išlaikant bandinius 2 h nustatytoje 400 °C ir 800 °C temperatūroje. Aukštoje temperatūroje buvo ištirti 189 bandiniai. Rezultatai parodė, kad CF ilgis ir jų kiekis neturi esminės įtakos bandinių mechaninėms savybėms veikiant aukštai temperatūrai.

Nagrinėjamoje mokslinėje literatūroje nepavyko rasti informacijos apie gamyklinės autoklavinio fibrocemento sudėties bandinių atsparumo aukštoms temperatūroms didinimo tyrimus, todėl šioje disertacijoje tiriami PGA ir AP priedų poveikis AFK makro- ir mikrostruktūros formavimui bei įtaka AFK mechaninėms savybėms prieš ir po gaisro temperatūros poveikio.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikta autoklavinio fibrocemento struktūros formavimo hidratacijos metu ir struktūros dehidratacijos, veikiant aukštoms temperatūroms, literatūros analizė rodo:

1. AFK naudojamas statinių elementams įrengti, o dėl gaisro temperatūros poveikio jis tampa svarbiu elementu, užtikrinančiu statinio esminių gaisrinės saugos reikalavimų įgyvendinimą. Besikeičiančios aplinkybės (gaisrų plitimo spartos didėjimas, degių medžiagų naudojimas, naujo teisinio reglamentavimo taikymas ir kt.) reikalauja atsparesnio standartinio gaisro temperatūros poveikiui AFK. Siekiant įgyvendinti tolesnį AFK naudojimą, atsižvelgiant į besikeičiančias aplinkybes, yra poreikis sukurti atsparesnį gaisro temperatūroms AFK.
2. AFK struktūros terminę destruktiją lemia hidratų skilimas, armavimo priedo išdegimas, užpildų elgsena ir vandens pašalinimas.
3. Dėl stabilesnės struktūros formavimo, veikiant aukštai temperatūrai, cementinėse medžiagose yra naudojama aliuminio šaltinį turinčių priedų.
4. Termiškai stabilesnio armavimo priedo naudojimas gali lemti didesnę medžiagos atsparumą standartinio gaisro temperatūrai (iki 841 °C).
5. Mokslinėje literatūroje nėra aprašyti AFK modifikavimo PGA ar AP priedais tyrimai.

Apibendrinus pirmojo skyriaus analizės rezultatus, suformuluoti tokie disertacijos darbo uždaviniai:

1. Nustatyti standartinio gaisro temperatūros poveikį nemodifikuoto autoklavinio fibrocemento kompozito makro- ir mikrostruktūrai, fizikinėms ir mechaninėms savybėms.
2. Ištirti autoklavinio fibrocemento kompozito su atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, priedu struktūros formavimąsi, fizikines ir mechanines savybes.
3. Ištirti autoklavinio fibrocemento kompozito su anglies plaušo priedu struktūros formavimąsi, fizikines ir mechanines savybes.

4. Nustatyti autoklavinio fibrocementito kompozito su atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, ar su anglies plaušo priedais sudėtį ir savybes, užtikrinančias atsparumą standartinio gaisro temperatūros poveikiui.

Žaliavos, tyrimų metodikos ir autoklavinio fibrocemento kompozito mišinių sudėtis

Šiame skyriuje aprašomos darbe naudotos žaliavos, jų savybės, tyrimų metodikos ir autoklavinio fibrocemento kompozito sudėtis. Skyriaus tematika paskelbtos dvi publikacijos (Veliseicik ir kt., 2022; Veliseicik ir kt., 2023).

2.1. Naudotos žaliavos

Darbe naudotos šios žaliavos:

- rišiamoji medžiaga – CEM I 42,5N markės portlandcementis (Lietuva);
- M32 ir M300 markės kvarcinis smėlis (Lietuva);
- celiuliozės plaušas (Ispanija);
- aliuminio hidroksidas (Jungtinė Karalystė);
- kaolinas (Lenkija);
- atlieka, susidaranti gaminant putstiklio granules (Lietuva);
- anglies plaušas (Kinija).

2.1.1. Portlandcementis

Bandiniams formuoti kaip rišamoji medžiaga buvo naudotas portlandcementis CEM I 42,5 N (toliau – PC), kuris atitinka LST EN 197-1 serijos standarto reikalavimus. Nurodytas standartas numato, kad PC turi sudaryti 95–100 % klinkeris ir 0–5 % kalcio sulfato priedas, dažnu atveju naudojamas gamtinis gipsas. Darbe vadovaujantis LST EN 196-2 serijos standarto reikalavimais buvo ištirta naudoto PC cheminė sudėtis, kuri pateikiama 2.1 lentelėje, o elementinė cheminė sudėtis – 2.3 lentelėje. Nustačius PC cheminę sudėtį, galima teigti, kad tirtame cemento, kaip įprastai, vyrauja kalcio ir silicio oksidai, be jų, jame yra įprastinių cemento sudėčiai būdingų oksidų. PC mineraloginė sudėtis (2.2 lentelė) buvo apskaičiuota pagal Bogue formulę (Žvironaitė ir kt., 2016). PC dalelių dydžio tyrimų rezultatai pateikiami 2.1 pav. Šis tyrimas buvo atliktas su „CILAS 1090“ prietaisu, o rezultatai parodė, kad PC dalelių dydis buvo nuo 0,1 μm iki 140 μm , o didžiąją dalį PC sudarė 10–50 μm dalelės. PC dalelės vidurkis buvo nustatytas 22 μm .

2.1 lentelė. Portlandcemenčio cheminė sudėtis

Table 2.1. Portland cement's chemical composition

Cheminė sudėtis, %								
CaO	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Kiti
64,36	20,85	2,92	3,51	3,94	1,31	0,58	0,11	2,42

2.2 lentelė. Portlandcemenčio mineraloginė sudėtis

Table 2.2. Portland cement's mineral composition

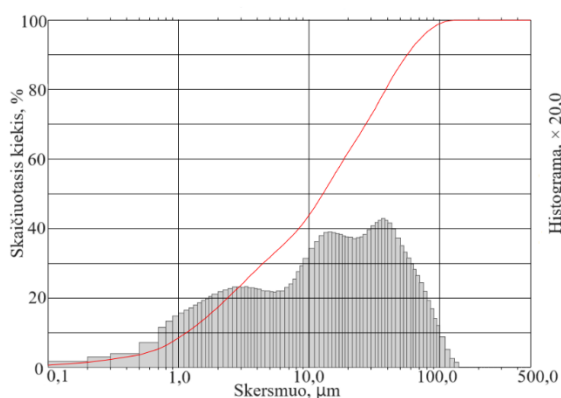
Mineraloginė sudėtis, %				
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Kiti
67,9	8,54	5,93	10,68	6,95

2.3 lentelė. Portlandcemenčio elementinė cheminė sudėtis

Table 2.3. Portland cement's elemental chemical composition

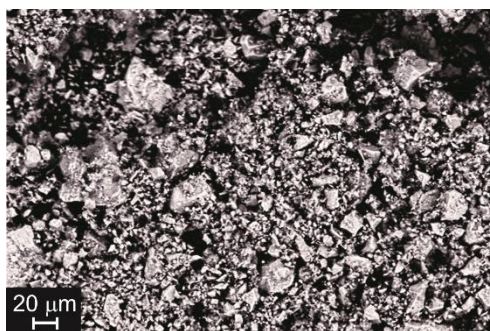
Cheminė sudėtis, %								
C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
4,2	42,0	1,7	1,3	5,1	2,0	1,4	40,1	2,2

PC dalelių elektroninės mikroskopijos paviršiaus tyrimai (2.2 pav.) rodo, kad dalelės yra netaisyklingos formos, jų paviršiai ir kampai yra aštrūs. PC didžiausių dalelių dydis yra ~50 μm , taip pat matomas didelis mažų dalelių skaičius.



2.1 pav. Portlandcemenčio dalelių pasiskirstymas pagal dydį

Fig. 2.1. Distribution of Portland cement particles by size



2.2. pav. Portlandcemenčio dalelių paviršius (1000 kartų didinimas)

Fig. 2.2. Surface of Portland cement's particles (zoomed-in 1000 times)

2.4 lentelė. Portlandcemenčio fizikinės ir mechaninės savybės

Table 2.4. Portland cement's physical and mechanical properties

Parametras, matavimo vnt.	Vertė
Dalelių dydis, μm	10–50
Dalelių piltnis tankis, g/cm^3	0,9–1,6
Savitasis paviršius, cm^2/g	3650
Rišimosi pradžia, min	60
Rišimosi pabaiga, min	720
Ankstyvasis gniuždymo stipris po 2 parų, MPa	> 10,0
Vėlyvasis gniuždymo stipris po 28 parų, MPa	42,5
Normalaus tirštumo cemento tešla, %	24,3

PC fizikinės ir mechaninės savybės pateiktos 2.4 lentelėje. Apibendrinus PC fizikines ir mechaninės savybes, galima teigti, kad PC sudėtyje vyrauja Si_2O ir CaO oksidai, kurių bendrasis kiekis yra ~85 %. PC sudėtyje yra ir kitų oksidų: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 ir kt. Vidutinis PC dalelės dydis yra 22 μm . Dilatometrijos tyrimai parodė, kad mažų PC dalelės, kurių dydis iki 10 μm , yra ~44 %.

2.1.2. Kvarcinis smėlis

Tyrimuose buvo naudojamas dviejų dalelių dydžių kvarcinis smėlis (M32) ir (M300), kuris atitinka LST EN 12620 serijos standarto reikalavimus. Kvarcinis smėlis (M300) fibrocementinių gaminių gamykloje papildomai buvo malamas rutuliniame malūne iki savitojo paviršiaus 4400 cm^2/g . Kvarcinio smėlio (M32) savitasis paviršius buvo 287 cm^2/g . Bandiniams naudoto kvarcinio smėlio cheminė sudėtis pateikiama 2.5 lentelėje, o elementinė cheminė sudėtis 2.6 lentelėje. Pagrindinė cheminė kvarcinio smėlio medžiaga yra silicio oksidas.

2.5 lentelė. Kvarcinio smėlio cheminė sudėtis

Table 2.5. Quartz sand's chemical composition

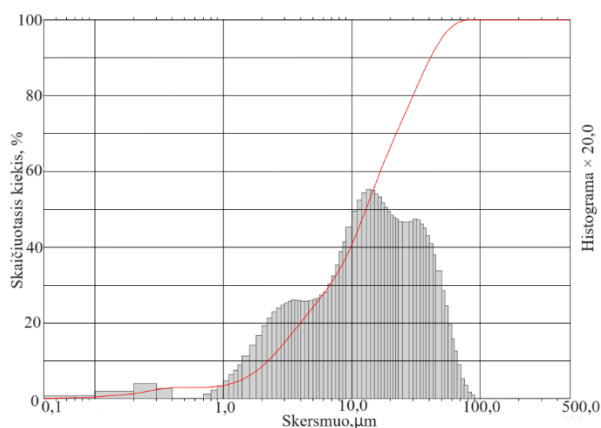
Cheminė sudėtis, %							
Kvarcinio smėlio žymuo	CaO	SiO_2	SO_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	R_2O	Kiti
M32	0,72	97,89	0,06	0,46	0,6	0,01	0,26
M300	0,69	97,81	0,05	0,55	0,59	0,01	0,30

2.6 lentelė. Kvarcinio smėlio elementinė sudėtis

Table 2.6. Quartz sand's chemical composition

Elementinė sudėtis, %						
Kvarcinio smėlio žymuo	C	O	Al	Si	S	Fe
M32	3,6	55,1	0,1	41,0	0,1	0,1
M300	3,3	55,1	0,2	41,1	0,1	0,2

Kvarcinis smėlis (M32), formuojant mikro- ir makrostruktūrą, buvo naudojamas kaip struktūros karkasas, o kvarcinis smėlis (M300) – kaip pucolaninė medžiaga hidroterminio kietinimo metu. Tyrimams panaudojus „CILAS 1090“ prietaisą, nustatyti kvarcinio smėlio (M300) dalelių dydžiai ir jų kiekio procentinis pasiskirstymas (2.3 pav.). Tyrimų rezultatai parodė, kad kvarcinio smėlio (M300) dalelių dydis buvo nuo 0,1 μm iki 90 μm , o didžiąją dalį – 63 % sudarė dalelės nuo 1 μm iki 20 μm , vidutinis dalelių dydis buvo 18 μm .



2.3 pav. Kvarcinio smėlio (M300) dalelių pasiskirstymas pagal dydį

Fig. 2.3. Distribution of quartz sand (M300) particles by size

Kvarcinio smėlio (M32) granulimetriniai tyrimai nebuvo atliekami, kadangi šio priedo kiekis bandiniuose nebuvo keičiamas.

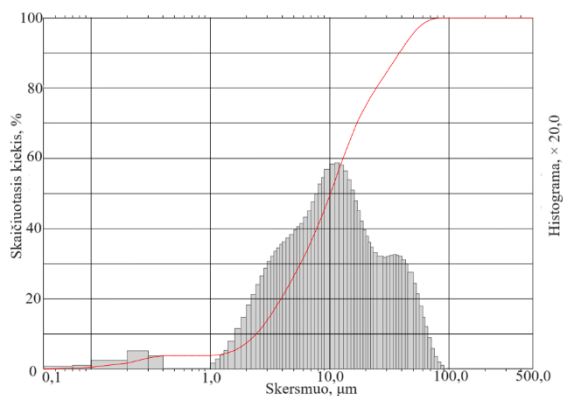
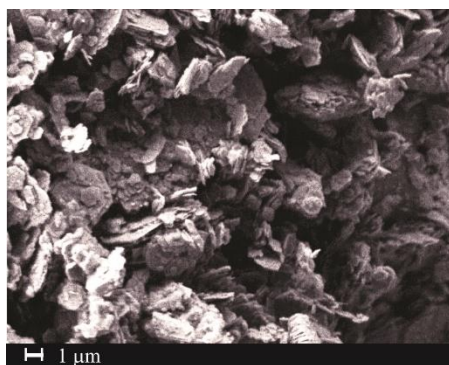
2.1.3. Atlieka, susidaranti gaminant putstiklio granules

PGA yra gaunama sijoiant pagamintas putstiklio granules. Gamyboje kaolinas yra naudojamas kaip granules atskirianti medžiaga, nereaguojanti su putstiklio granulėmis 800 °C temperatūroje. Krosnyje degimo metu granulės išsipučia ir nesulimpa, nes sukamojoje krosnyje yra atskiriančiosios terpės kaolino, kuris šioje temperatūroje virsta į metakaoliną. PGA buvo naudojamas iš dalies pakeisti PC ir kvarcinį smėlį (M300). Išnagrinėjus literatūros šaltinių duomenis (Kocak, 2020; Wei ir kt., 2019; Weng ir kt., 2013), buvo pasirinkta iki 30 % PC pakeisti PGA, o kituose bandiniuose PGA pakeisti iki 100 % malto kvarcinio smėlio (M300). PGA cheminė sudėtis pateikiama 2.7 lentelėje. Daugiausia PGA sudėtyje yra silicio ir aliuminio oksidų. PGA savitasis paviršius yra 7036 cm²/g. Atlikus granulometrijos bandymus su „CILAS 1090“ prietaisu, nustatytas PGA dalelių dydžio procentinis pasiskirstymas, kuris pateikiamas 2.4 pav. PGA dalelių dydžio tyrimo rezultatai parodė, kad tiriamos medžiagos dalelių dydis svyruoja nuo 0,1 μm iki 90 μm, tačiau didžiausia dalis buvo 10 μm dydžio dalelės, o vidutinis dalelių dydis – 15 μm.

2.7 lentelė. PGA cheminė sudėtis**Table 2.7.** Expanded glass granule production waste's chemical composition

Cheminė sudėtis, %									
CaO	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Ti ₂ O	Kiti
2,51	50,48	0,06	0,75	33,7	0,62	0,61	10,19	0,43	0,65

Buvo atliktas PGA vaizdo fiksavimas elektroniniu mikroskopu, didinant 5000 kartų. Mikrostruktūra buvo tiriama lauko emisijos skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu. Taip buvo sudaryta galimybė tirti elektrai laidžiu sluoksniu nepadengtą paviršių ir, be to, atlikti pasirinktoje paviršiaus vietoje dėl kaitinimo atsirandančių kitimų tyrimą.

**2.4 pav.** PGA dalelių pasiskirstymas pagal dydį**Fig. 2.4.** PGA particles by size**2.5 pav.** PGA dalelių paviršius (5000 kartų didinimas)**Fig. 2.5.** Surface of expanded glass granules producing waste particles (zoomed-in 5000 times)

2.5 pav. matyti, kad PGA yra netaisyklingos formos plokštelės. Padengdamos granulių paviršių jos puikiai atlieka atskiriančiosios fazės vaidmenį putstiklio granulių gamybos metu. Apibendrinus PC fizikines ir mechanines savybes, galima teigti, kad PGA sudėtyje vyrauja SiO_2 ir Al_2O_3 oksidai, kurių bendrasis kiekis ~84 %. Vyraujančiųjų oksidų kiekis yra panašus kaip ir PC. Verta paminėti Na_2O oksidą, kurio sudėtyje yra ~10 %, tačiau jis nėra sutinkamas PC sudėtyje.

2.1.4. Celiuliozės pluoštas

Bandiniams formuoti buvo naudojamas armavimo pluoštas iš dviejų tipų natūralios celiuliozės. Vieno tipo celiuliozės plaušeliai, kurių kiekis sudėtyje 5,45 %, yra trumpi, o kito tipo celiuliozės plaušeliai, kurių sudėtyje 1,64 %, išsiskleidžia į vadinamąją „vėduklę“. Celiuliozės pluoštų mišinys buvo ruošiamas fibrocementinių gaminių gamykloje, juos kapojant ir plaušinant dideliame kiekyje vandens. Celiuliozės pluoštų mišinio cheminė sudėtis pateikiama 2.8 lentelėje. Iš esmės celiuliozės pluoštų mišinys susidaro iš anglies ir deguonies cheminių elementų ir jų tarpusavio ryšių.

2.8 lentelė. Celiuliozės pluoštų mišinio elementinė cheminė sudėtis

Table 2.8. Cellulose fibre mix's elemental chemical composition

Cheminė sudėtis, %					
O	C	S	K	Ca	Kiti
48,3	50,0	0,4	0,91	0,1	0,29

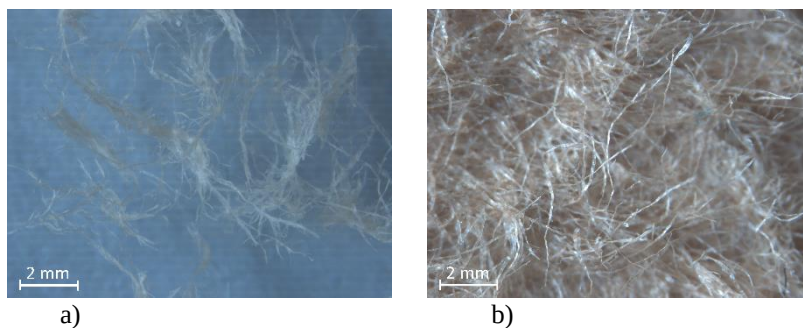
Celiuliozės pluoštų mišinio fizikinės ir mechaninės savybės pateikiamos 2.9 lentelėje.

2.9 lentelė. Celiuliozės pluoštų mišinio fizikinės ir mechaninės savybės

Table 2.9. Carbon fibre's physical and mechanical properties

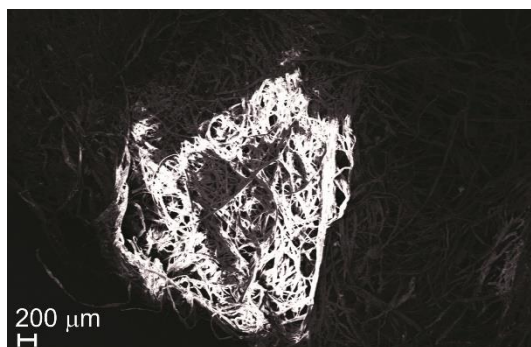
Parametras, matavimo vnt.	Vertė
Plaušo ilgis, mm	7
Plaušo skersmuo, μm	240
Pirolizės temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	250
Tamprumo stipris, MPa	132
Tamprumo modulis, GPa	9
Vandens įgėris, %	60

Buvo atliktas celiuliozės plaušelių vaizdo fiksavimas optiniu mikroskopu, didinant 25 kartų. Makrostruktūros tyrimo metu aiškiau nustatyti skirtumai tarp celiuliozės pluoštų. Tyrimas parodė, kad vieni celiuliozės plaušeliai yra ~4 mm ilgio, kiti ilgesni, jų ilgis apie 8–10 mm (2.6 pav.).



2.6 pav. Celiuliozės plaušeliai (25 kartų didinimas):
a – trumpi celiuliozės plaušeliai; b – „vėduoklės“ tipo plaušeliai

Fig. 2.6. Cellulose fibre (zoomed-in 25 times):
(a) shorter cellulose fibre; (b) hand-fan-type cellulose fibre



2.7 pav. Celiuliozės pluoštų mišinio paviršius (50 kartų didinimas)

Fig. 2.7. Surface of cellulose fibre mix (zoomed-in 50 times)

Buvo atliktas celiuliozės pluoštų mišinio tyrimas elektroniniu mikroskopu, didinant vaizdą 50 kartų. Vizualiai matyti (2.7 pav.), kad celiuliozės pluoštų mišinio plaušeliai yra netaisyklingos formos ir tarpusavyje persipinantys įvairiomis kryptimis. Nustatyta, kad plaušeliai yra įvairių formų ir plokčių. Jų paviršius yra nelygus su įraižomis ir įdubomis.

2.1.5. Anglies plaušas

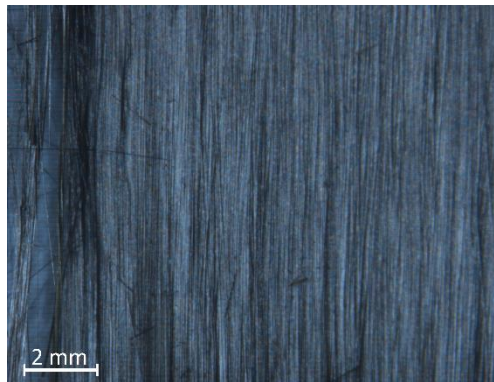
Darbe buvo naudojamas vandenyje išsiplaušinantis trumpas anglies plaušas, kurio ilgis yra 6 mm. Išnagrinėjus mokslinės literatūros šaltinius, nustatyta, kad celiuliozės pluoštas gali būti keičiamas anglies plaušu iki 1 % (Liu ir kt., 2018; Pehlivanli ir kt., 2016; Guo ir kt., 2021). Anglies plaušo cheminė sudėtis pateikiama 2.10 lentelėje. Anglies plaušas yra sudarytas iš anglies cheminio komponento.

2.10 lentelė. Anglies plaušo elementinė cheminė sudėtis

Table 2.10. Carbon fibre's elemental chemical composition

Cheminė sudėtis, %	
O	C
0,1	99,9

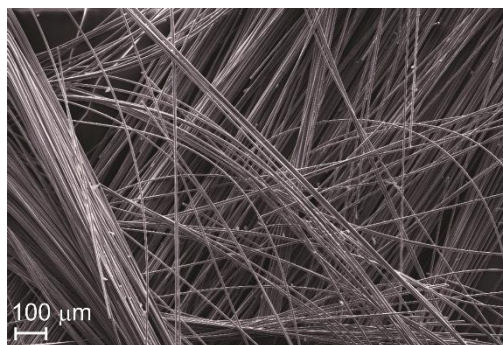
Makrostruktūros tyrimas optinės mikroskopijos metodu parodė, kad anglies plaušeliai yra taisyklingos pailgos formos (2.8 pav.).



2.8 pav. Anglies plaušo paviršius (25 kartų didinimas)

Fig. 2.8. Carbon fibre (zoomed-in 25 times)

Anglies plaušo tyrimas elektroniniu mikroskopu, didinant vaizdą 100 kartų (2.9 pav.), parodė, kad, atvirkščiai nei celiuliozės plaušai, anglies plaušai yra standūs ir tarpusavyje nepersipina.



2.9 pav. Anglies plaušo paviršius (100 kartų didinimas)

Fig. 2.9. Carbon fibre (zoomed-in 100 times)

2.11 lentelė. Anglies plaušo fizikinės ir mechaninės savybės

Table 2.11. Carbon fibre's physical and mechanical properties

Parametras, matavimo vnt.	Vertė
Plaušo ilgis, mm	6
Plaušo skersmuo, μm	7
Plaušo tankis, g/l	350
Lydymosi temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	3500
Tamprumo stipris, MPa	4,275
Tamprumo modulis, GPa	225
Vandens įgėris, %	> 0,3

Gamintojo deklaruotos anglies plaušo fizikinės ir mechaninės savybės pateiktos 2.11 lentelėje.

Palyginus celiuliozės plaušo ir tiriamojo mechanines savybes, nustatyta, kad anglies plaušas yra termiškai atsparesnis, turintis didesnę tamprumo modulį. Šios anglies plaušo charakteristikos gali lemti autoklavinio fibrocemento kompozito mechaninių savybių padidėjimą. Anglies plaušo paviršius lygus, plaušai yra santykinai vienodo ilgio ir pločio.

2.1.6. Kiti priedai

Tirtų bandinių sudėtyje buvo panaudoti aliuminio hidroksido ir kaolino priedai. Šie priedai yra aliuminio šaltiniu, kuris lemia termiškai stabilesnių naujųjų susidarymą, taip pat jais reguliuojamas hidratacijos procesas (Cooke ir Akers, 2008). $\text{Al}(\text{OH})_3$ fizikinės ir mechaninės savybės pateiktos 2.12 lentelėje.

2.12 lentelė. $\text{Al}(\text{OH})_3$ fizikinės savybės**Table 2.12.** $\text{Al}(\text{OH})_3$ physical properties

Parametras, matavimo vnt.	Vertė
Dalelės dydis, μm	>3
Tankis, g/cm^3	2,42
Lydymosi temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	300
Tirpumas vandenyje, $\text{g}/(100 \text{ mL})$	0,0001
Savitasis paviršiaus plotas, m^2/g	17,8

Kaolino cheminė sudėtis pateikiama 2.13 lentelėje, o fizikinės savybės 2.14 lentelėje.

2.13 lentelė. Kaolino cheminė sudėtis**Table 2.13.** Kaolin chemical composition

Cheminė sudėtis, %								
CaO	SiO_2	Na_2O	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	K_2O	Ti_2O	Kiti
0,15	47,26	0,25	1,32	34,84	0,38	0,61	1,4	13,79

2.14 lentelė. Kaolino fizikinės savybės**Table 2.14.** Kaolin physical properties

Parametras, matavimo vnt.	Vertė
Dalelės dydis, μm	25–35
Tankis, g/cm^3	2,6
Lydymosi temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	2500
Kietumas, Moso skalė	2–2,5

Apibendrinus $\text{Al}(\text{OH})_3$ fizikines savybes galima teigti, kad šio priedo dalelės yra mažiausios, palyginti su kitais komponentais, o kaolino dalelių dydis buvo panašus į PC dalelių, tačiau didesnis už PGA daleles. Kaolino poveikis cementinėms medžiagoms yra panašus kaip ir PGA dėl panašios cheminės sudėties. Kaoliną sudaro SiO_2 ir Al_2O_3 , kurių bendrasis kiekis yra ~82 %. Kaolinas savo sudėtyje turėjo mažesnę Na_2O oksido kiekį.

2.2. Autoklavinio fibrocemento kompozito bandinių formavimas

Disertacijoje buvo tiriama AFK sudėtis, artima gamybinei fasadinių fibrocementinių plokščių sudėčiai. Tyrimai buvo atliekami keičiant dalį PC ar maltą kvarcinį smėlį (M300) į PGA. PGA kiekis, keičiant PC ir maltą kvarcinį smėlį (M300), buvo parinktas atsižvelgus į kitų mokslininkų atliktus tyrimus (Amer ir El-Hoseny, 2017; Klimesh ir Ray, 1998; Dinakar ir kt., 2013). Buvo pasirinkta, kad mišinys 10 %, 20 % ir 30 % PC bus pakeista PGA. Bandiniai buvo žymimi atitinkamai C10, C20 ir C30. Kitu atveju AFK sudėtyje malto kvarcinio smėlio (M300) 50 % ir 100 % buvo keičiama į PGA, o bandiniai atitinkamai pažymėti žymenimis MKS50 ir MKS100, šiuose bandiniuose cementas nebuvo keičiamas.

Formuojant C ir MKS serijos bandinius, pirmiausia buvo maišomi sausieji komponentai: PC, kvarcinis smėlis (M32 ir M300), kaolinas, $\text{Al}(\text{OH})_3$ ir PGA. Vėliau į mišinį buvo įdėtas celiuliozės pluoštų mišinys ir vanduo. Vandens ir PC santykis parinktas atsižvelgiant į literatūros duomenis ir buvo lygus $V/C = 0,3$ (Chen ir kt., 2018). Maišymui naudotas 20 ± 2 °C temperatūros vandentiekio vanduo. Komponentai 5 min buvo maišomi laboratorinėje maišyklėje (Hobarto tipo) (BRIO Hranice, Čekija) 45 rpm greičiu.

Siekiant geresnių kompozito mechaninių savybių po gaisro temperatūros poveikio, dalis celiuliozės armavimo pluoštų mišinio buvo keičiama AP priedu. AP kiekis tiriamuose bandiniuose buvo 0,5 %, 0,75 % ir 1 % nuo celiuliozės mišinio masės. Šie bandiniai buvo žymimi AP050, AP075 ir AP100. Prieš bandinių formavimą pirmiausia sausai buvo maišomas kvarcinis smėlis (M32) su AP, o vėliau įdedami kiti sausi komponentai. Taip pat, kaip ir maišant C ar MKS serijos bandinių mišinius, po sausųjų komponentų buvo dedamas celiuliozės pluoštų mišinys ir vanduo. Tolesnės AP bandinių maišymo ir formavimo sąlygos nesiskyrė.

Fizikinėms ir mechaninėms savybėms palyginti buvo formuojami E serijos bandiniai (kontroliniai), kurių maišymas ir formavimas nesiskyrė nuo C ir MKS serijos bandinių. Mišinių komponentų kiekiai įvairiose bandinių serijose pateikti 2.15 lentelėje. Tyrimams buvo suformuota po 12 vnt. kiekvienos serijos bandinių.

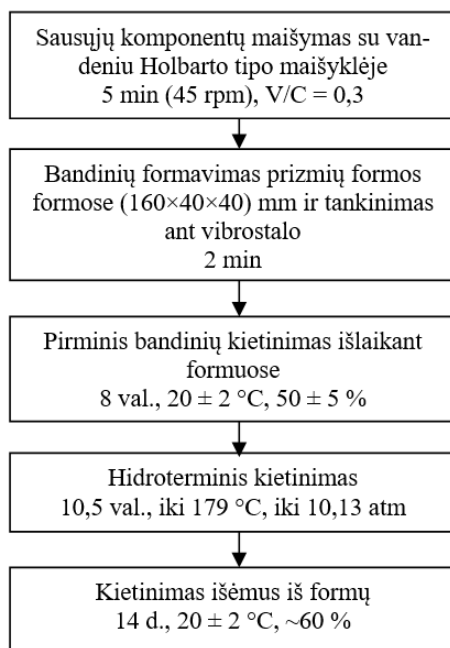
Iš sumaišytų mišinių buvo formuojamos prizmės, kurių matmenys – $160 \times 40 \times 40$ mm. Įpylus AFK mišinį į formas, bandiniai buvo 2 min tankinami naudojant vibrostalą. Paskui sutankinti bandiniai 8 h buvo laikomi formose, esant 20 ± 2 °C temperatūrai ir 50 ± 5 % drėgmei. Po kietinimo formose bandiniai toliau buvo kietinami hidroterminėmis sąlygomis. Kietinimas autoklave vyko 10,5 h sočiųjų vandens garų aplinkoje, esant 10,13 atm slėgiui, 179 °C temperatūroje (2.10 pav.).

2.15 lentelė. Procentinė komponentų sudėtis atskirose bandinių serijose, masės, %**Table 2.15.** Number of raw materials in different mixtures, mass, %

Bandinių žymuo	Kvarcinis smėlis, M32	Kvarcinis smėlis, M300	Cementas	Celiuliozės pluoštas	Al(OH) ₃	Kaolinas	PGA	AP
E	41,05	10,0	38,04	7,09	2,06	1,76	–	–
C10	41,05	10,0	34,24	7,09	2,06	1,76	3,8	–
C20	41,05	10,0	30,44	7,09	2,06	1,76	7,6	–
C30	41,05	10,0	26,64	7,09	2,06	1,76	11,4	–
MKS50	41,05	5,0	38,04	7,09	2,06	1,76	5,0	–
MKS100	41,05	–	38,04	7,09	2,06	1,76	10,0	–
AP050	41,05	10,0	38,04	6,59	2,06	1,76	–	0,5
AP075	41,05	10,0	38,04	6,34	2,06	1,76	–	0,75
AP100	41,05	10,0	38,04	6,09	2,06	1,76	–	1,0

**2.10 pav.** Bandinių kietinimo grafikas**Fig. 2.10.** Samples curing graph

Po hidroterminio kietinimo bandiniai buvo išimti iš formų ir laikomi 14 parų klimatinėje kameroje 20 ± 2 °C temperatūros ir ~60 % santykinės drėgmės sąlygomis. Apibendrinta bandinių formavimo schema pateikiama 2.11 pav.



2.11 pav. Bandinių formavimo schema

Fig. 2.11. Sample formation scheme

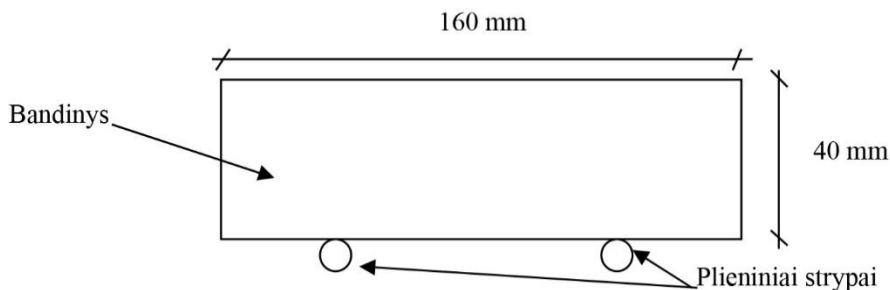
Autoklavinio fibrocemento kompozito plokščių imitacijos bandiniai buvo formuojami 450×120×10 mm dydžio. Jų formavimo eiga analogiška formuojamųjų prizmių bandiniams ir buvo vykdoma pagal 2.11 pav. Po hidroterminio kaitinimo autoklavinio fibrocemento kompozito plokščių imitacijos bandiniai iki bandymų buvo laikomi ne mažiau kaip 14 parų klimatinėje kameroje 20 ± 2 °C temperatūros ir ~60 % santykinės drėgmės sąlygomis.

2.3. Standartinio gaisro temperatūros sąlygos

Standartinio gaisro temperatūros sąlygos buvo sukuriamos naudojant 5,6 kW galios elektrinį kaitinimo prietaisą. Elektrinis kaitinimo prietaisas turi 200×200×250 mm kaitinimo kamerą, kurioje sumontuoti 8 vnt. po 0,7 kW galios elektrinių kaitinimo elementų, kurių bendroji galia – 5,6 kW. Visi elektriniai elementai sujungti lygiagrečiai ir yra išdėstyti kaitinimo kameros viršutinėje dalyje. Standartinio gaisro temperatūros poveikis buvo tiriamas su puse bandinių, t. y. po 6 vnt. iš kiekvienos serijos. Bandymo metu tiriamieji bandiniai po 2 vnt. buvo įdedami į kaitinimo kamerą ant plieninių 6 mm skersmens metalinių strypų, taip

užtikrinant aukštos temperatūros poveikį visiems bandinio paviršiams (2.12 pav.). Kaitinimo prietaise buvo parinktas standartinio gaisro temperatūros kilimo režimas (žr. (1.2) formulę). Elektrinio kaitinimo prietaiso anga buvo užtaisysa akmens vatos plokštė, kurios storis buvo 30 mm, o tankis 80 kg/m^3 . Po 30 min bandymo, pasiekus 841°C temperatūrą, elektrinis kaitinimo įrenginys buvo išjungtas, akmens vatos plokštė pašalinta, o bandiniai buvo ištraukti ir palikti atvėsti įprastomis laboratorijos sąlygomis.

Šio bandymo veikimo principas yra sukurti tūrinį kaitinimą pagal standartinę gaisro temperatūros kreivę, taip kaip tai numato LST EN 1363-1:2020 standartas.



2.12 pav. Bandinio atrėmimo kaitinimo kameroje schema

Fig. 2.12. Mounting sample in heating chamber scheme

Atvėsinus bandinius, jie iki kitų atliekamų tyrimų buvo laikomi kondicionavimo patalpoje, atitinkančioje LST EN 13238 standarto reikalavimus, t. y. $20 \pm 2^\circ\text{C}$ temperatūros ir $50 \pm 5\%$ santykinės drėgmės sąlygomis.

2.4. Tyrimų metodikos

Bandinių iš visų formavimo masių sudėčių tyrimai ir fizikinių, mechaninių savybių, struktūrinių charakteristikų nustatymas buvo atliekami vienodomis sąlygomis iki standartinio gaisro poveikio ir po standartinio gaisro temperatūros poveikio.

Bandinių ir komponentų cheminė analizė buvo atlikta naudojant rentgeno spindulių fluorescencinės spektroskopijos su bangų dispersija (angl. *WD-XRF Wave dispersion X-ray fluorescence spectroscopy*) metodą. Naudotas spektrometras Axios MAX (PANalytical, Nyderlandai) su 4 kW rentgeno spindulių šaltiniu su Rh anodu.

Cheminės sudėties kiekybinė analizė atlikta beetaloniniu metodu, naudojant programinę įrangą „Omnian“ (PANalytical, Nyderlandai). Spektrometras sukalibruotas naudojant 16 spektrometro gamintojo pateiktų standartinių etalonų. Mėgi-

niai buvo susmulkinti, o vėliau sumalti rutuliniame malūne Pulverisette 6 (FRIT-SCH, Vokietija). Naudojant hidraulinį presą TP-20 (Herzog, Vokietija), iš bandinio miltelių ir vaško (20 % nuo masės) mišinio suspaustos 37 mm skersmens 3 mm storio tabletės.

Bandinių ir žaliavų makrostruktūros tyrimai buvo atlikti optiniais mikroskopais Zeiss Observer.D1m (Zeiss, Vokietija) ir Leica M165 FC (Leica Microsystem, JAV). Tiriant bandinių makrostruktūrą, buvo stebimos ir fiksuojamos charakteringos vietos, jas didinant iki 100 kartų. Šis bandymo metodas leido tirti bandinius visu dydžiu.

Komponentų ir bandinių mikrostruktūra ir kontakto zonos tarp armuojančiojo priedo ir cementinės matricos buvo ištirtos naudojant elektroninius skenuojančiuosius mikroskopus SEM JEOL JSM-7600F (JEOL, Japonija) ir SEM EVO LS 25 (Zeiss, Vokietija). Tiriant bandinius, specialus jų paviršiaus padengimas nebuvo taikomas, o naudojamas iki 5000 kartų didinimas. Tiriant bandinių mikrostruktūrą, buvo atskelti tiriamieji objektai iš bandinio vidurio.

Tyrimų metu apskaičiuotas AFK bandinių orasausis tankis, kuris buvo nustatytas atsižvelgiant į LST EN 1015 standarto reikalavimus. Bandinių orasausis tankis buvo nustatomas po bandinių džiovinimo klimatinėje kameroje Memmert (Memmert GmbH + Co. KG, Vokietija), esant 105 ± 5 °C temperatūrai, iki pastoviosios masės ir skaičiuojamas pagal (2.1) formulę:

$$\rho_{orassausis} = \frac{m}{V} \times 10^6, \text{ kg/m}^3, \quad (2.1)$$

čia m – išdžiovinto bandinio masė, g; V – bandinio tūris, mm^3 .

AFK bandinių ilgalaikis vandens įgėris buvo nustatytas iš dalies pritaikius LST EN ISO 16535 standarto 2 metodo procedūras. Bandiniai visiškai panardinti į indą su vandeniu, jų masės matavimai buvo atliekami po 0,5, 1, 3, 6, 12, 18, 24, 36, 42, 48, 60, 72, 96, 110 ir 134 h. Bandymas baigtas, kai skirtumas tarp paskutiniojo ir atliekamojo matavimo neviršijo 0,1 %. Prieš svėrimą bandiniai buvo nusausinami drėgna šluoste, taip pašalinamas perteklinis vanduo. Ilgalaikis vandens įgėris apskaičiuotas pagal (2.2) formulę:

$$W_i = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100, \%, \quad (2.2)$$

čia m_0 – bandinio masė prieš bandymą, g; m – bandinio masė po bandymo, g.

Biriųjų komponentų dalelių pasiskirstymas pagal dydį buvo atliktas analizavimo prietaisu „Cilas 1090“ (Cilas, Prancūzija). Tyrimai atlikti PC, kvarciniam smėliui (M300) ir PGA komponentams, kurių kiekis AFK bandiniuose buvo keičiamas.

AFK bandinių struktūros pokyčiai buvo tiriami ultragarso impulso sklidimo greičio fiksavimo metodu. Tam tikslui naudotas prietaisas „Pundit 7“ (CNS Farnell, Didžioji Britanija). Bandymas atliktas po AFK bandinių džiovinimo klimatinėje kameroje. Tiriamieji bandiniai buvo dedami tarp dviejų ultragarso keitiklių (tiekimo ir ėmimo), veikiančių 54 kHz dažniu. Matavimai atlikti išilgai bandinių, keitikliai buvo priešingose tiriamojo bandinio pusėse. Siekiant pagerinti ultragarso impulso sklidimą, buvo naudojamas vazelinas. UIG apskaičiuotas pagal (2.3) formulę:

$$V = \frac{l}{t} \times 10^6, m/s, \quad (2.3)$$

čia l – bandinio ilgis tarp keitiklių, m; t – impulso sklidimo laikas, s.

Diferencinė termogravimetrinė analizė DTG ir termogravimetrinė analizė TG buvo atlikta naudojant termogravimetrinius analizatorius „Linseis STA 1600“ (Selb, Germany) ir „Netzsch Libra TG209 F1“ (NETZSCH, Japonija). Bandymų metu temperatūra matuota K tipo termopora, naudotas aliuminio oksido (Al_2O_3) tiglis su dangteliu. Terminė analizė atlikta azoto dujinėje aplinkoje, užtikrinant azoto debitą 0,04 l/min. Bandymai buvo atlikti nuo 35 °C iki 1000 °C izotermėse. Šiam kaitinimo režimui numatytas 10 °C/min temperatūros kilimo greitis. Bandiniai buvo sumalti rutuliniame malūne Pulverisette 6 (FRITSCH, Vokietija). Bandinių masė svyravo tarp 78–83 mg. Rezultatai pateikiami paveiksluose, kur absčių ašyje buvo fiksuojama tam tikra temperatūros kreivė, o ordinačių ašyje – termogravimetrijos ir diferencinės termogravimetrijos rezultatai.

Darbo metu atlikta rentgeno fazinė analizė. Naudotas rentgeno spindulių difraktometras „SmartLab“ (Rigaku, Japonija) su 9 kW rentgeno spindulių šaltiniu su besisukančiu Cu anodu. Šaltinio darbo režimas: $U_a = 45$ kV, $I_a = 200$ mA. Siekiant sumažinti plokščiojo mėginio storio kitimo kaitinimo metu įtaką rentgenogramos tikslumui, buvo naudota lygiagrečiųjų spindulių pluoštelio rentgeno spindulių optika. Mėginys tirtas aukštatemperatūroje kameroje DHS 1100 (Anton Paar, Austrija) helio dujų atmosferoje, esant 26 °C, 110 °C, 220 °C, 400 °C, 640 °C, 740 °C, 900 °C ir 1000 °C temperatūroms. Temperatūros kilimo greitis 10 °/min, prieš pradedant registruoti (matuoti) rentgenogramą, mėginys 10 min buvo išlaikomas pasirinktoje temperatūroje. Rentgenogramos matuotos difrakcijos kampų intervale 10–60°. Scintiliacinio detektoriaus judėjimo greitis – 3 °/min.

Fazių (mineralų) identifikavimas atliktas naudojant polikristalų rentgenogramų apdorojimo ir analizavimo programinę įrangą PDXL-2 (Rigaku, Japonija) ir tarptautinę ICDD (angl. *International Crystallographic Data Database*) kristalografinių duomenų bazę PDF4+ (2019 m. leidimo). Prieš analizuojant visas ne kambario temperatūroje (26 °C) užrašytas rentgenogramas, buvo įvedamos 2 Θ kampo pataisos pagal kvarco difrakcines smailes, t. y. 2 Θ kampai padidinami tiek,

kad rentgenogramoje esančios kvarco smailės sutaptų su PDF4+ duomenų bazės kvarco kortelėje #00-046-1045 pateiktomis 2Θ kampų vertėmis.

Rengenografiniai AFK tyrimai atlikti difraktometru DRON-7 (Cu anodas, Ni filtras, monochromatorius, plyšiai 1:8:0,5 mm). Difraktometro vamzdelio darbo režimas: $U = 30$ kV, $I = 10$ mA. Užrašyta difraktograma buvo šifruojama, lyginant gautas eksperimentines tarpplotkštuminių atstumų d ir linijų santykinio integralinio intensyvumo I/I_0 reikšmes su atitinkamomis reikšmėmis ASTM kartotekoje.

AFK bandinių gniuždymo stipris buvo nustatomas H200kU (Tinius Olsen, JAV) gniuždymo presu, kurio galia iki 200 kN, o apkrovos paklaida iki 0,5 %. Buvo pasirinkta 60 N/s apkrovos augimo sparta ir apkrova pridedama iki visiškos bandinio destruktijos. Galutiniai rezultatai buvo įvertinti atlikus ne mažiau kaip 5 bandinių tyrimus. Gniuždymo stipris apskaičiuotas pagal (2.4) formulę:

$$f_c = \frac{F}{A_c}, MPa, \quad (2.4)$$

čia F – didžiausia gniuždymo apkrova, N; A_c – bandinio skerspjūvio plotas, mm^2 .

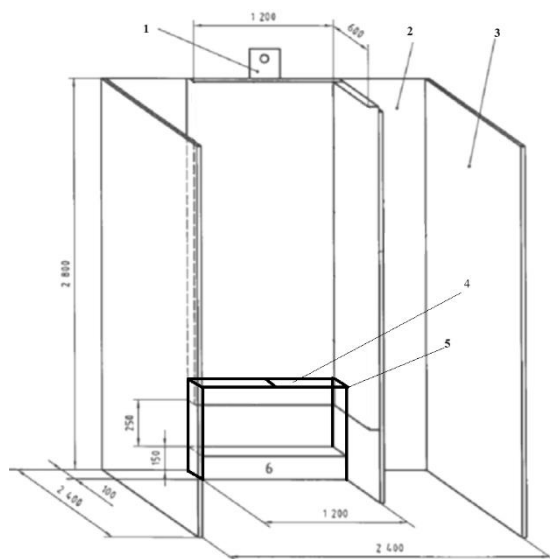
Buvo tirtas ir AFK bandinių lenkimo stipris trijų taškų metodu, koncentruojant lenkimo jėgą į bandinio vidurį per visą jo ilgį. Bandymams atlikti naudota Hounsfield H10KS (Tinius Olsen, JAV) įranga. Šiam bandymui pasirinkta 14 N/s apkrovos augimo sparta ir bandymas buvo tęsiamas iki visiškos bandinio destruktijos. Galutiniai rezultatai įvertinti atlikus ne mažiau kaip 5 bandymus. Lenkimo stipris apskaičiuotas pagal (2.5) formulę:

$$f_{cf} = \frac{1,5Fl}{bh^2}, MPa, \quad (2.5)$$

čia F – didžiausia lenkimo apkrova, N; l – tarpas tarp atraminių taškų, mm; b – bandinio plotis, mm; h – bandinio aukštis, mm.

AFK degumo bandymai buvo atlikti vadovaujantis LST EN ISO 1716 standarto reikalavimais. Bandymų metu apskaičiuojama bandinio suminė ir visuminė degimo šiluma (PCS). Pagal visuminę degimo šilumą (PCS), vadovaujantis LST EN 13501-1 standarto reikalavimais, vėliau nustatoma degumo klasė. Bandymams atlikti naudota Precyzja (Lenkija) įranga. Mėginiai buvo susmulkinti, o pasukui sumalti rutuliniame malūne Pulverisette 6 (FRITSCH, Vokietija), vėliau kondicionuojami pagal LST EN 13238 standarto reikalavimus iki pastoviosios masės. Vienai AFK sudėties degumo klasei nustatyti buvo atlikti 3 PCS nustatymo bandymai. Bandymas atliktas suslėgto deguonies (99,5 %) aplinkoje, keliant temperatūrą ne sparčiau negu 0,01 °C /10 min greičiu. Su bandymo įranga sujungto kompiuterio programine įranga apibendrinami bandymo rezultatai ir apskaičiuojamas bandinio šilumingumas.

AFK atsparumo ugniai bandymai buvo atlikti pagal autoriaus patobulintą bandymo metodiką. Kaip metodikos pagrindas naudota LST ISO 13785-1 standarto procedūra. Buvo koreguojamas bandymo objekto montavimas ir kriterijų vertinimas. Suprojektuotas ir įrengtas tiriamųjų plokščių montavimo rėmas, su kuriuo atkartojamas lango angokraščio įrengimas ir vidaus gaisro liepsnos jam poveikis (2.13 pav.).



2.13 pav. Atsparumo ugniai bandymo įrangos schema (adaptuota Guillaume ir kt., 2018): 1 – šilumos spinduliavimo matuoklis, 2 – montavimo siena (laikančioji), 3 – šoninė siena, 4 – bandinio montavimo vieta, 5 – bandinio rėmas, 6 – dujinis degiklis

Fig. 2.13. Scheme of fire resistance testing equipment (adopted by Guillaume et al., 2018): 1 – heat fluxmeter, 2 – support wall, 3 – draught screen, 4 – specimen mounting place, 5 – testing frame, 6 – gas burner

Bandymo metu buvo naudojamas standarte numatytas $100 \text{ kW} \pm 2 \text{ kW}$ galios gaisro židinio imitavimas. Tiriami AFK bandiniai buvo plokščių imitacija, jų dydis $450 \times 120 \times 10 \text{ mm}$. AFK bandiniai montuoti prie bandymo rėmo pagal fasado plokščių gamintojo rekomendacijas. Sumontavus bandinius, jie buvo horizontalioje pozicijoje 1 m atstumu nuo degiklio. Bandymas vyko 15 min, atsižvelgiant į normatyviniuose teisės aktuose numatytą atsparumą ugniai lauko sienoms. Po bandymo vizualiai buvo vertinamas bandinių vientisumas, įtrūkių kiekis ir dydis. Ekspertimeninio bandymo metu ištirti 3 bandiniai (kontrolinių ir modifikuotų sudėties bandinių).

Ant bandomosios AFK plokštės, liepsnos veikiamame paviršiuje, gaisro temperatūros vertėms įvertinti tolygiai buvo pritvirtintos 6-ios K tipo termoporos. Temperatūros bandymo metu fiksuotos saviraščio įrenginiu „Eurotherm 6180A“ (Jungtinė Karalystė).

Darbe buvo atlikta regresinė statistinė analizė, kuri yra konceptualiai paprastas metodas funkciniais ryšiams tarp kintamųjų tirti (Chatterjee ir Hadi, 2012). Dažniausiai regresinė analizė naudojama vienam (arba daugiau) iš trijų tikslų pasiekti (Chatterjee ir Smirnoff, 2013):

- sumodeliuoti priklausomybę tarp x ir y kintamųjų;
- tiksliniam kintamajam nustatyti (prognozuoti);
- hipotezėms tikrinti.

Darbe buvo naudojamas tiesinės regresijos metodas, kuris aprašomas pagal (2.6) matematinę formulę:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_{pi} x_{pi} + \varepsilon_i, \quad (2.6)$$

čia y_i – kintamasis; x_{pi} – nekintamasis; β_i – krypties koeficientas; ε_i – liekamoji paklaida.

Aprašant tiesinės regresijos rezultatus, įprasta nurodyti regresijos lygtį, aprašyti kintamuosius, nurodyti determinacijos koeficientą R^2 ir pateikti sklaidos diagramą su regresijos tiese.

Eksperimentiniams duomenims surinkti ir statistiškai juos apdoroti buvo naudotos kompiuterinės programos „Microsoft Office Excel“. Nustatant PGA ir AP priedų poveikį ir priklausomybes AFK, buvo taikomas matematinis ir statistinis duomenų apdorojimas.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, dalelių pasiskirstymas pagal dydį yra panašus į maltą kvarcinį smėlį ir siek tiek mažesnis už portlandcemenčio daleles. Atsižvelgiant į tai, maltas kvarcinis smėlis ir dalis portlandcemenčio galėtų gali būti keičiama į atlieką, susidarantią gaminant putstiklio granules, siekiant geresnį kompozito mechaninių ir gaisrinės saugos savybių.
2. Atlikus tyrimus nustatyta, kad naudojamas anglies plaušas yra mažesnis už celiuliozės plaušą, o bendrasis armavimo priedų panaudojimas gali sustiprinti kompozito struktūrą, kas galėtų pagerinti kompozito mechanines ir gaisrinės saugos savybes.
3. Išsiaiškinta, kad tam tikri medžiagų struktūros tyrimo metodai gali įvertinti autoklavinio fibrocementa kompozito su atlieka, susidarantią

gaminant putstiklio granules, ar su anglies plaušo priedais struktūros formavimąsi, mikro- ir makrostruktūrą, dehidrataciją, struktūros destrukciją, veikiant standartinio gaisro temperatūrai.

4. Siekiant įvertinti autoklavinio fibrocemento kompozito su atliekos, susidaranti gaminant putstiklio granules, ar su anglies plaušo priedais gaisrinės saugos savybes ir charakteristikas, tyrimams taikomi standartiniai gaisriniai bandymai ir autoriaus patobulinta metodika.

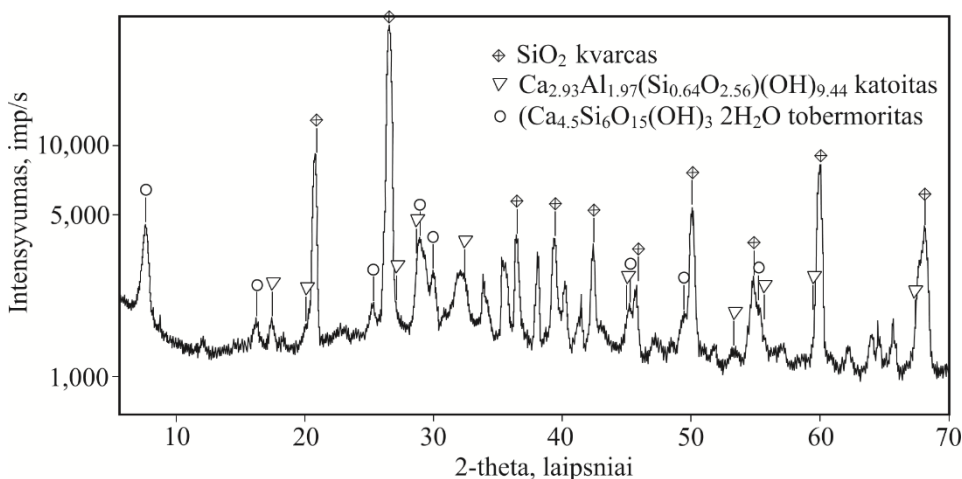
Autoklavinio fibrocemento kompozito struktūros, fizikinių ir mechaninių savybių tyrimai

Šiame skyriuje pateikiami tyrimų rezultatai parodo PGA ar AP priedų poveikį AFK. Pirmiausia buvo tiriamos galimybės PGA iš dalies pakeisti PC ir maltą kvarcinį smėlį (M300) AFK sudėtyje. Buvo nagrinėjama hidratacija, mikro- ir makrostruktūros susidarymas ir priedų poveikis bandinių mechaninėms savybėms. Vėliau buvo įvertinamas standartinio gaisro temperatūros poveikis AFK bandiniams su priedais. Tiriamas dehidratacijos procesas, makro- ir mikrostruktūros pokytis, bandinių mechaninės savybės. Taip pat buvo tiriamas AP priedo poveikis AFK bandiniams iš dalies pakeitus celiuliozės plaušo mišinį. Tirtas makro- ir mikrostruktūros susidarymas ir priedo poveikis AFK mechaninėms savybėms. Taip pat, kaip ir bandiniuose su PGA priedu, buvo įvertintas standartinio gaisro temperatūros poveikis, po kurio nustatyti makro- ir mikrostruktūros pokyčiai, mechaninės savybės ir šių charakteristikų priklausomybės. Tirtoms bandinių sudėtimis, kurios pasižymėjo didžiausiu mechaninių savybių liekamuoju stipriu po standartinio gaisro temperatūros poveikio, ištirtos gaisrinės saugos savybės ir charakteristikos, naudojant standartinius gaisrinius tyrimus ir autoriaus patobulintą metodiką.

Skyriaus tematika paskelbtos dvi publikacijos (Veliseick ir kt., 2022; Veliseick ir kt., 2023). Taip pat pranešimas, kuris pristatytas vienoje mokslinėje konferencijoje.

3.1. Autoklavinio fibrocementito tyrimai

Išnagrinėjus mokslinę literatūrą, nustatyta, kad aukštos temperatūros poveikis cementines medžiagas, tarp jų ir AF, veikia destruktiviai (Khoury, 2000; Ranachowski ir kt., 2019; Hager, 2013). Tiriant šiuos procesus, buvo atlikta AF fazinė rentgeno analizė, kuri indentifikavo dehidrataciją ir aukštos temperatūros destrukcijos kinetiką AF. Kambario temperatūroje (26 °C) atlikti rentgenografiniai tyrimai pateikiami 3.1 pav.



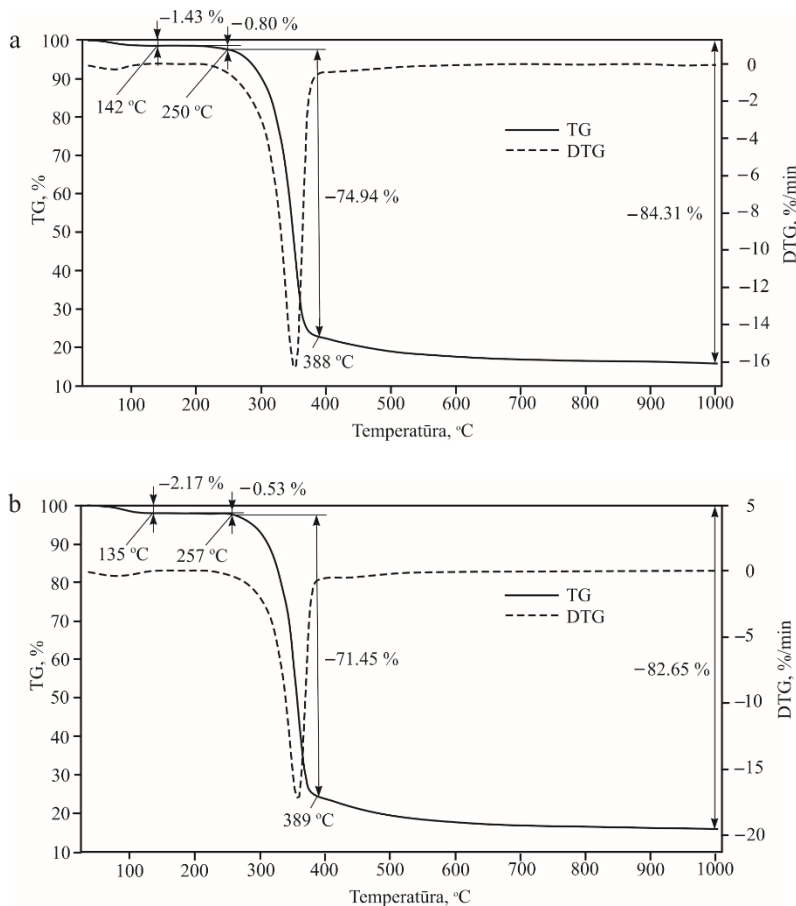
3.1 pav. AF XRD, esant 26 °C temperatūrai

Fig. 3.1. AF XRD at 26 °C temperature

Rentgenogramoje matomos intensyvios smailės, kurios yra priskiriamos kvarciniam smėliui. AF tyrimo metu užfiksuotas tobermoritas – tai pagrindinis hidratas, CSH grupės mineralas. Be to, rentgenogramoje matomos ir katoito hidrato smailės. Žinoma, kad AF sudėtyje yra ir celiuliozės pluoštų mišinys, kuris nėra atsparus aukštos temperatūros poveikiui, tai gali turėti įtakos.

XRD ir TG tyrimai patvirtina celiuliozės išdegimą AF bandiniuose, veikiant standartinio gaisro kreivei. Esant 400 °C temperatūrai, celiuliozės pėdsakų bandinyje neaptinkama. Atlikti celiuliozės pluoštų terminės analizės tyrimai rodo, kad

jų terminė destrukcija prasideda esant 250 °C temperatūrai, o visiškai degiųjų komponentų išdegimas įvyksta iki 389 °C temperatūros (3.2 pav.).



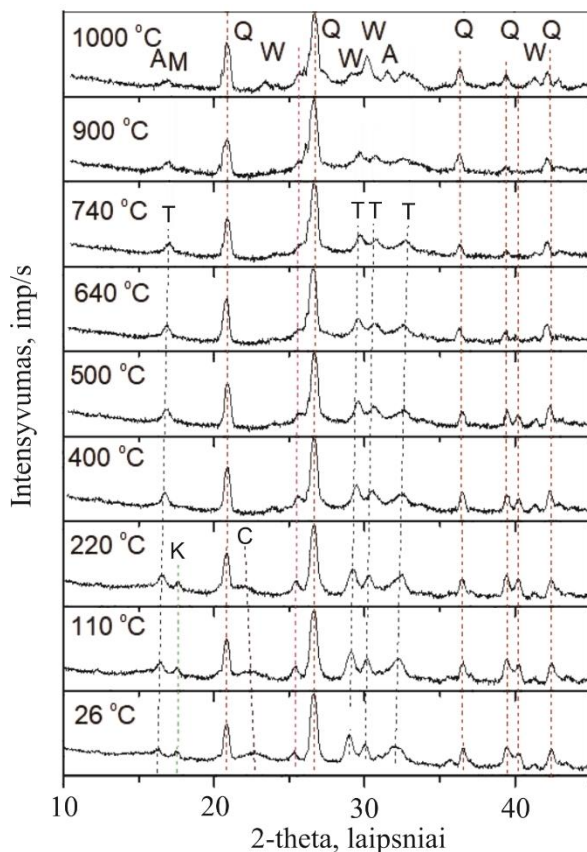
3.2 pav. Celiuliozės pluoštų terminė analizė: trumpųjų pluoštų celiuliozė (a), „vėduoklės“ tipo pluoštų celiuliozė (b)

Fig. 3.2. Thermal analysis of cellulose fibre: short cellulose fibre (a), “hand-fan” type cellulose fibre (b)

Esant didesnei nei 250 °C temperatūrai, prasideda celiuliozės komponentų skilimas. Pirmiausia skyla hemiceliuliozė, vėliau celiuliozė, o po jos – ligninas (Ornaghi ir kt., 2023). Standartinio gaisro temperatūros režime vyksta ir vandens pašalinimas iš celiuliozės. Iki 220 °C pašalinamas absorbuotasis vanduo, aukšte-

nėje temperatūroje – chemiškai surištas vanduo (Scheirs ir kt., 2001). Panašūs celiuliozės terminės destrukcijos tyrimų rezultatai nurodomi ir mokslinėje literatūroje (Liping ir kt., 2016).

Apibendrinta AF fazių kinetika, veikiant aukštai temperatūrai, pateikiama 3.3 pav.



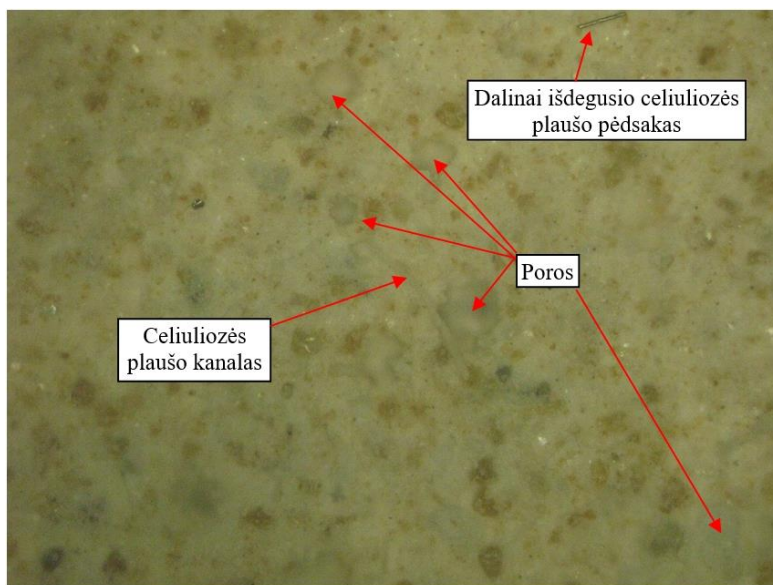
3.3 pav. AF XRD skirtingose temperatūrose: Q – kvarcas, T – tobermoritas, K – katoitas, C – celiuliozė, W- volostonitas, M – mulitas, A – akermanitas

Fig. 3.3. AF XRD in different temperatures: Q – quartz, T – tobermorite, K – katoite, C – cellulose, W – wollastonite, M – mullite, A – akermanite

Išnagrinėjus XRD rezultatus, matyti, kad AF aplinkos temperatūroje aptinkamas katoitas, kvarcas, tobermoritas ir celiuliozė. Pirmuosiuose temperatūros kėlimo etapuose iki 110 °C ir iki 220 °C temperatūros XRD pokyčių neparodė. Aukštesnėje 400 °C temperatūroje matomas katoito ir celiuliozės smalių dingi-

mas, kuris rodo, kad šie komponentai nėra aptinkami bandinyje. Esant tokiai temperatūrai, celiuliozė bandinyje išdega. Tai patvirtina anksčiau aprašytas celiuliozės pluošto destrukcijos modelis aukštoje temperatūroje. Katoito terminė destrukcija panašiose temperatūrose yra aprašyta ir kitų mokslininkų (Eisinas ir kt., 2019; Passaglia ir kt., 1984). Aukštesnėje temperatūroje matomas tobermorito virsmas į volostonitą. Literatūroje nurodoma, kad tai įvyksta 820 °C temperatūroje (Majdinasab ir Yuan, 2020).

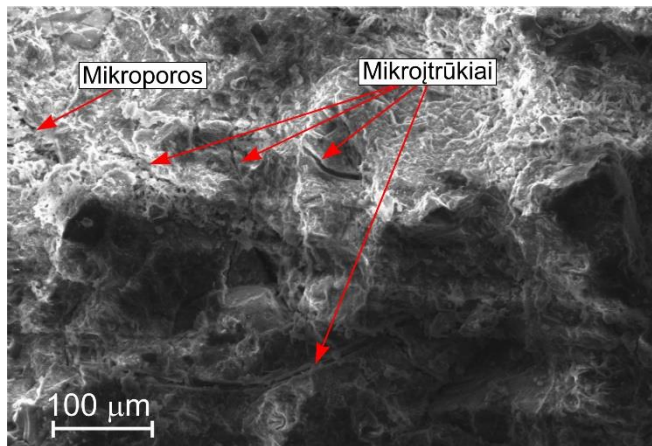
AF rentgeno fazinė analizė po aukštos temperatūros poveikio parodė hidratų dehidrataciją ir celiuliozės išdegimo bandinio struktūroje faktą. Tiriant AF bandinius, buvo atlikti makro- ir mikrostruktūros tyrimai. Makrostruktūros tyrimai po standartinio gaisro temperatūros poveikio parodė porų susidarymą ir celiuliozės plaušų išdegimą. Dalis celiuliozės plaušelių liko apanglėjusi dėl galbūt santykinai trumpo standartinio gaisro temperatūros poveikio. AF bandinio makrostruktūros vaizdas parodytas 3.4 pav.



3.4 pav. AF makrostruktūra po standartinio gaisro temperatūros poveikio (100 kartų didinimas)

Fig. 3.4. AF macrostructure after standard fire temperature exposure (zoomed-in 100 times)

AF mikrostruktūros tyrimai parodė detalesnį vaizdą po standartinio gaisro temperatūros poveikio (3.5 pav.).



3.5 pav. AF mikrostruktūra po standartinio gaisro temperatūros poveikio (1000 kartų didinimas)

Fig. 3.5. AF microstructure after standard fire temperature exposure (zoomed in 1000 times)

Papildomai tiriant mikrostruktūrą, matomi aukštos temperatūros poveikio ir hidratų dehidratacijos sukelti mikroįtrūkiai. Taip pat mikrostruktūroje matomos ir dėl dehidratacijos proceso atsiradusios mikroporos.

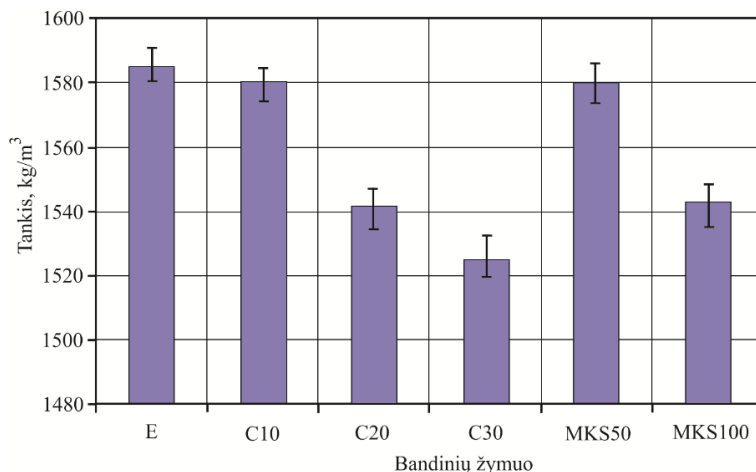
3.2. Atliekos, susidaranti gaminant putstiklio granules, poveikis autoklavinio fibrocementu savybėms iki standartinio gaisro temperatūros poveikio

Šiame skyriuje tiriamųjų bandinių sudėtis aprašyta antrajame skyriuje (2.15 lentelė). Tiriama sudėtis bandinių C10, C20, C30, kuriuose dalis cemento buvo pakeista į atlieką, susidaranti gaminant putstiklio granules. Taip pat MKS50 ir MKS100 bandiniai, kur maltas kvarcinis smėlis buvo keičiamas atliekos, susidaranti gaminant putstiklio granules, priedu. Keičiamojo komponento ir priedo kiekiai buvo parinkti atsižvelgiant į atliktą mokslinės literatūros analizę, kuri aprašyta pirmajame skyriuje. Siekiant įvertinti priedo poveikį mikrostruktūrai, įvertintas bandinių tankis. Išnagrinėjus ultragarso impulso sklaidimo greičio ir ilgalaikio vandens įgėrio tyrimo rezultatus, įvertinta bandinių mikrostruktūra bei poringumas. Šiame skyriuje išanalizuota bandinių mikro- ir makrostruktūra, panaudojus optinės ir elektroninės skenuojamosios mikroskopijos tyrimo metu gau-

tus rezultatus. Ištirtas mikro-, makroporų ir hidratų susidarymas. Terminės analizės tyrimų rezultatai leido nustatyti priedo poveikį hidratams ir sąsają su atsparumu aukštai temperatūrai. Atlikta mechaninių savybių tyrimų rezultatų analizė. Nustatytos fizikinių ir mechaninių savybių priklausomybės ir tendencijos priklausomai nuo panaudotojo priedo kiekio ir keičiamojo komponento.

3.2.1. Tankio tyrimai

Siekiant nustatyti PGA poveikį AFK struktūros formavimui, pirmiausia buvo įvertintas tankis. Be E žymeniu pažymėtų AFK bandinių, buvo tiriami ir C10 – C30 bei MKS50, MKS100 žymenimis pažymėti bandiniai. Apibendrinti tankio rezultatai, panaudojus PGA, yra pateikiami 3.6 pav.



3.6 pav. Bandinių tankis

Fig. 3.6. Sample density

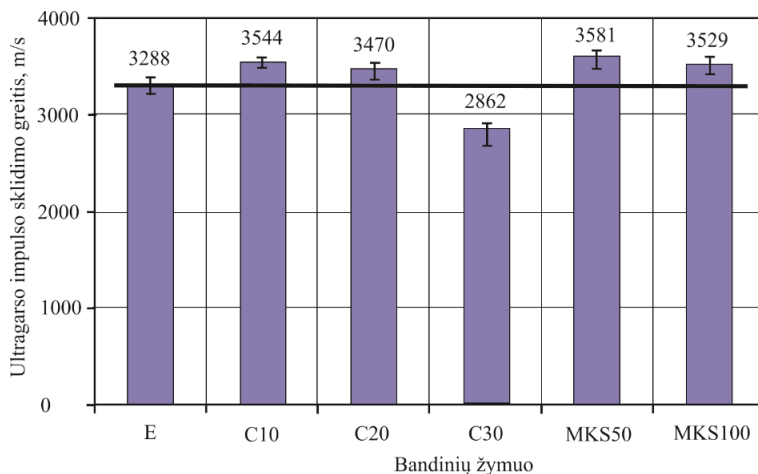
Atlikus eksperimentinius tyrimus matyti, kad PGA visais atvejais mažina AFK bandinių tankį. Tankio sumažėjimas nėra labai ryškus, daugiausia – 4 % tankis sumažėjo C30 bandiniuose, palyginti su kontrolinio bandinio (E) rezultatais. Tada, kai PGA buvo keičiamas maltas kvarcinis smėlis (M300), didžiausias tankio sumažėjimas buvo MKS100 bandiniuose, jis sudarė 3 %. Iš esmės tankio sumažėjimas visais tiriamais atvejais nesiekė 5 %, palyginti su E žymeniu pažymėtais bandiniais. Bandinių tankis svyruoja tarp 1500–1600 kg/m³.

Analizuojant bandinių sausąjį tankį, nustatyta loginė seka, pagal kurią PGA mažina bandinių tankį. Iš dalies tai yra dėl to, kad PGA yra lengvesnė už keičiamąjį cementą ar maltą kvarcinį smėlį. Nustatyta, kad PGA mažina cementinių me-

džiagų tankį (Šeputytė-Jucikė, 2016). Mokslininkė nurodė, kad PGA priedas sumažina cemento akmens tankį dėl PGA priedo savitojo paviršiaus ploto padidėjimo (2,5 karto), palyginti su portlandcemenčio dalelėmis. Khatib ir kt. (2012), tirdami PGA poveikį cementinėms medžiagoms, nustatė, kad betono tankis mažėja didinant PGA kiekį. Žymus tankio sumažėjimas buvo nustatytas viršijus 20 % PGA kiekį. C20 ir C30 bandinių atvejais tankio sumažėjimas, palyginti su C10 bandiniais, yra didesnis. Tačiau nagrinėjamu atveju yra svarbūs ir hidratacijos produktai bei jų kiekis, kurie susidaro hidroterminėmis sąlygomis. Vertinant pagrindinius susidarancius mineralus, yra žinoma, kad PGA keičiant kvarcą (iki 12 %) cementinėse sistemose susidaro daugiau tobermorito (Klimesh ir Ray, 1998). Hidratacijos produktų tankis $2,18\text{--}2,6\text{ g/cm}^3$ – CSH (Pellenq ir kt., 2009), o tobermorito $2,48\text{ g/cm}^3$ (Thomas ir kt., 2010). Dėl CSH plačių tankio ribų sudėtinga atlikti palyginamuosius tyrimus, tačiau gauti rezultatai parodė, kad dėl CSH kompleksinės mikrostruktūros, tai nėra esminis veiksnys, turintis įtakos sausojo tankio pasikeitimui.

3.2.2. Ultragarso impulso sklaidimo greičio tyrimai

Atlikti UIG tyrimai, kurių rezultatai pateikiami 3.7 pav. Bandiniuose C10 ir C20 nustatytas UIG buvo didesnis nei E bandiniuose, o C30 bandiniuose jis net 13 % mažesnis. Nustatytas MKS50 bandinių UIG buvo didžiausias iš visų tirtų bandinių, jis 8,9 % didesnis už E bandinių greitį. MKS100 bandinių UIG buvo šiek tiek mažesnis už MKS50 ir C10, tačiau vis tiek didesnis už E bandiniuose buvusį sklaidimo greitį. Visų bandinių UIG svyravo 2862–3581 m/s ribose.

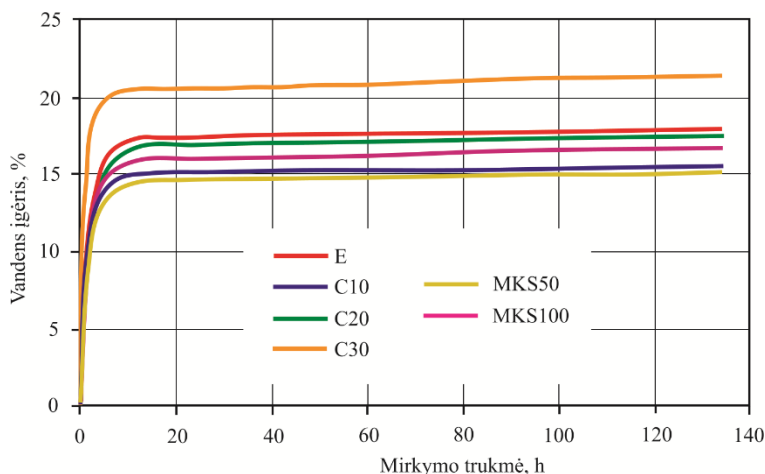


3.7 pav. Bandinių UIG
Fig. 3.7. Sample UIG

Įprastai teigiama, kad UIG priklauso nuo medžiagos tankio. Kuo tankesnė medžiaga, tuo didesnis šis greitis. Kitų mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad PGA priedas padidina tobermorito kristališkumą, o jis yra mažesnis ir kompaktiškesnis. Al jonai, pakeičiantys Si jonus, išsidėsto kompaktiškiau (Pan ir kt., 2016). Įvertinus pirmajame skyriuje aprašytas PGA ir cemento hidratacijos produktų reakcijas ir atliktų tyrimų rezultatus, galima teigti, kad tobermorito kristališkumas atsispindi UIG bandymo rezultatuose. Bandiniai C10, MKS50, MKS100 turi nemažą tobermorito kiekį, palyginti su E bandiniais, todėl ir juose UIG greitis yra didesnis (3.7 pav.). C30 bandiniuose, kaip parodė DTG tyrimai, yra nesureagavusio PGA (3.14 pav.), kurio dalelių dydis tinkamas užpildo funkcijoms atlikti. Teoriškai smulkiosios PGA dalelės įsispraudžia tarp hidratų, taip sutankindamos makrostruktūrą. Tačiau praktiškai šio įsispraudimo neįvyko, ir eksperimentų metu didesnę įtaką struktūros tankinimui turėjo mikrostruktūros formavimasis. Be abejonės, bandinių porų dydis ir kiekis taip pat turi reikšmės UIG greičiui, dėl to gautas tyrimų rezultatas priklauso nuo visų aplinkybių (hidratacijos produktų, porų dydžio, jų kiekio, tankio ir kt.) (Zhu ir kt., 2011; Sedar ir kt., 2020).

3.2.3. Ilgalaikio vandens įgėrio tyrimai

Darbe buvo nustatyta bandinių įgėrio pagal bandinio masę kinetika. Jos rezultatai pateikiami 3.8 pav. Tyrimo rezultatai parodė, kad C30 bandiniai turėjo didžiausią įgėrį, kuris po 134 h siekė 21,35 %. Mažiausias įgėris buvo MKS50 bandiniuose – 15,12 %. Visų bandinių įgėris, išskyrus C30, palyginti su E serijos bandiniais, buvo mažesnis. Daroma išvada, kad PGA didina AFK ilgalaikį vandens įgėrį.



3.8 pav. Bandinių ilgalaikio vandens įgėris
Fig. 3.8. Samples of long-term water absorption

Žinoma, kad PGA priedas didina bandinių poringumą, kai jo kiekis viršija 25 % ribą (Frías ir Cabrera, 2000). Mokslininkai, tyrę tiek PGA, tiek maltojo kvarcinio smėlio poveikį, nurodė, kad iki 20 % PGA priedo mažina kapiliarinį poringumą, taip kaip ir 10 % maltojo kvarcinio smėlio (Poon ir kt., 2003). Kiti mokslininkai, tyrę kvarcinio smėlio poveikį, nustatė, kad jo padidėjimas bandiniuose mažina bandinių poringumą. Schober (2011) tai paaiškina kvarco smėlio dalelių įsispraudimu į susidariusias mikroporas. Tiriamuoju atveju bandiniai susideda iš skirtingų komponentų, kurių tarpusavio reakcijos hidratacijos ir hidroterminio kietinimo metu priklauso nuo jų susidarančių derinių ir kitų vykstančio proceso aplinkybių. Poringumą gali lemti ir susidarantys hidratatai bei jų kiekis. Tokiu atveju CSH gali didinti matricos kompaktiškumą, tačiau CASH, kuris susidaro PGA ir portlandito hidratacijos metu, turi priešingą poveikį (Frías ir Cabrera, 2000). Aliuminio naudojimas tobermorite formuoja poras, kurių vidutinis dydis – 27,41 μm . Šis dydis mažesnis negu porų dydis susidarančio įprasto tobermorito atveju (Guo ir kt., 2017). Įmirkio bandymai patvirtino UIG tyrimo metu nustatytus rezultatus, kai tankiausia matricos struktūra buvo MKS50 bandiniuose. Iš esmės visų bandinių, išskyrus C30 bandinius, poringumas buvo mažesnis negu E bandinių. MKS50, C10 bandiniuose PGA ir maltas kvarcinis smėlis dalyvavo formuojant tankią struktūrą. PGA priedas suformavo kompaktišką tobermoritą su įterptu aliuminiu, kuris galėtų būti suformuojamas mikroporos vidinėje pusėje. Maltas kvarcas suformavo CSH, kuris užpildė nanoporas. Teoriškai MKS100 bandinių atveju galimas tobermorito kiekis yra didesnis nei nagrinėjamų MKS50 ar C10 bandinių atvejais, tačiau šioje sistemoje visiškai nėra malto kvarcinio smėlio. Tiriamųjų fibrocemento bandinių sudėtis yra kompleksinė, esamas kvarcinis smėlis (M32) taip pat gali formuoti tankią struktūrą, o jo paviršiuje taip pat formuojamas tobermoritas. C20 bandiniuose dėl sumažėjusio cemento kiekio tobermorito kiekis yra mažesnis, tačiau sistemoje lieka malto kvarcinio smėlio, kuris, kaip turintis mažesnę pucolanių aktyvumą, lieka sistemoje ir užpildo mikroporas (Taylor, 1997).

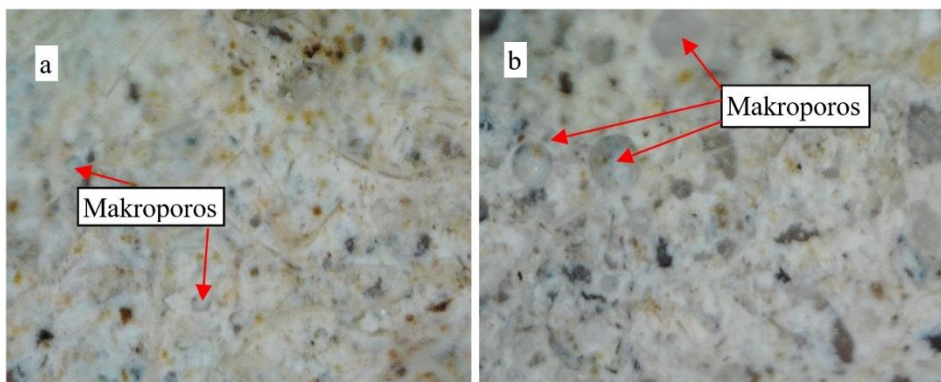
3.2.4. Makro- ir mikrostruktūros tyrimai

Makrostruktūros tyrimai optiniu mikroskopu parodė vizualiai matomą porų pokytį bandiniuose. Nustatyta, kad E bandiniai turi mažiau makroporų, palyginti su C30 bandiniais, kurių sudėtyje buvo panaudotas PGA (3.9 pav.).

Šie rezultatai atitinka prieš tai atliktų UIG ir ilgalaikio vandens įgėrio rezultatus, ir patvirtina tas pačias tendencijas.

Mikrostruktūros bandinių tyrimai parodė, kad, be makroporų susidarymo, bandiniuose su PGA atsiranda ir mikroporų (3.10 pav.), o jų kiekis, palyginti su E bandiniais, yra didesnis.

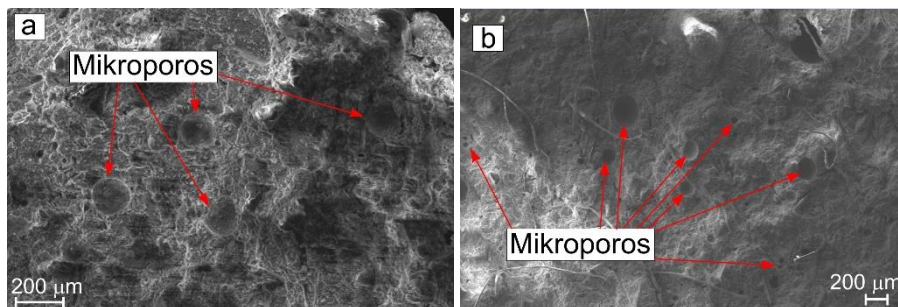
Kitas svarbus mikrostruktūros įtakos vaidmuo, turintis esminę reikšmę bandinių mechaninėms savybėms, yra hidratų susidarymas. Išnagrinėjus mokslinės literatūros šaltinius, tapo žinoma, kad dalis cemento hidratų formuoja stipresnę mikrostruktūrą, o kiti hidratatai elgiasi atvirkščiai. Žinoma, kad tobermoritas ir kai kurie kiti silikatai turi trigrandes formas, kuriuose silicio tetraedrai koordinuojami Ca^{2+} jonais, pakartojant tokios jungties požymius kas trečią tetraedrą.



3.9 pav. Bandinių makrostruktūra (12 kartų didinimas):

E bandinys (a), C30 bandinys (b)

Fig. 3.9. Sample-macro structure (zoomed-in 12 times): E sample (a), C30 sample (b)



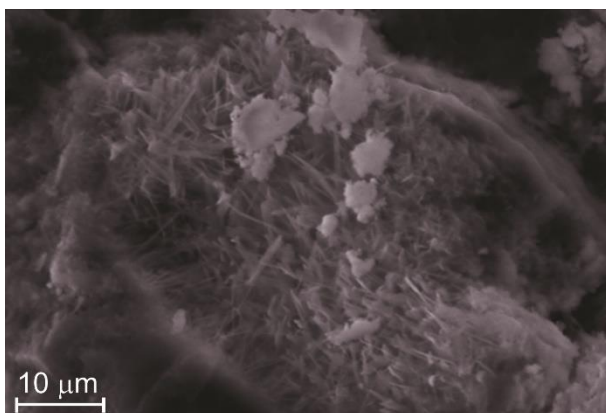
3.10 pav. Bandinių mikrostruktūra (1000 kartų didinimas):

E bandinys (a), C30 bandinys (b)

Fig. 3.10. Sample micro-structure (zoomed-in 1000 times): E sample (a), C30 sample (b)

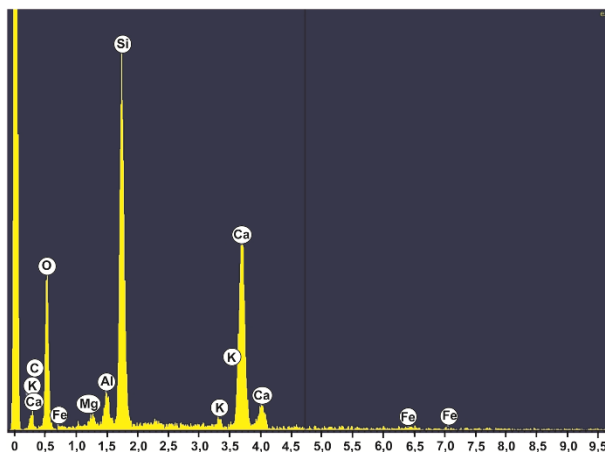
Tobermorito struktūroje du iš trijų tetraedrų savo centrinėje Ca-O sluoksnio struktūroje turi deguonies atomus, kuriais dalinasi tarpusavyje. Tobermorito trečiasis tetraedras vadinamas „jungiamuoju“ (Richardson ir kt., 1993). Mokslininkų tyrimuose buvo nustatyta, kad PGA priede esantys Al^{3+} jonai tobermorito kristalinėje gardelėje pakeičia SiO_4^{2-} jonus, sudarydami trigrandes jungtis sustiprindami

mikrostruktūrą (Guo ir kt., 2017). Atlikus palyginamuosius susiformavusio tobermorito cheminės sudėties tyrimus AFK bandiniuose, nustatyta, kad PGA didina aliuminio kiekį šiame hidrate. Tipinė cheminės sudėties nustatymo vieta, kurioje buvo atliekami tyrimai, yra pateikiama 3.11 pav.



3.11 pav. Tobermorito vaizdas MKS100 bandinio mikrostruktūroje (3000 kartų didinimas)

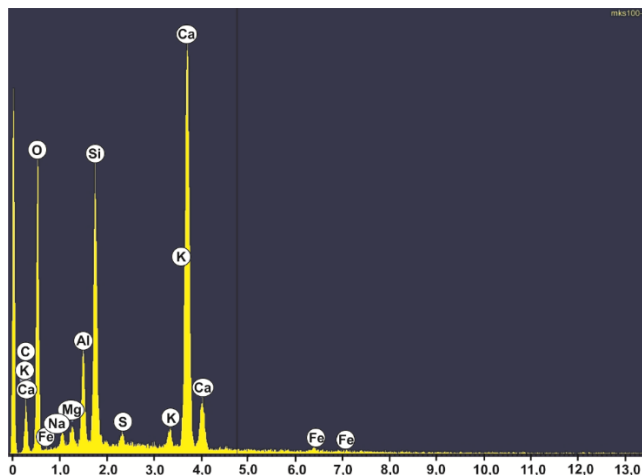
Fig. 3.11. View of tobermorite in MKS100 sample micro-structure (zoomed in 3000 times)



3.12 pav. E bandinio tobermorito cheminė sudėtis

Fig. 3.12. Tobermorite in E sample's chemical composition

Vizualiai palyginti Al kiekį bandiniuose galima 3.12 ir 3.13 pav. Matyti, kad aliuminio smailės aukštis MKS100 bandinyje yra aukštesnis už E bandinio. Nustatyta, kad bandiniuose, kur buvo panaudotas PGA, aliuminio kiekis yra didesnis.



3.13 pav. MKS100 bandinio tobermorito cheminė sudėtis
Fig. 3.13. Tobermorite in MKS100 sample's chemical composition

3.1 lentelė. Tobermorito elementinės cheminės sudėties rezultatai, masės %

Table 3.1. Tobermorite elemental chemical composition results, % of the mass

Bandinys	Elementinė cheminė sudėtis, %							
	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
E	10,9	52,6	1,7	10,2	0,4	0,2	23,6	0,4
C10	10,1	51,1	5,8	9,8	0,7	1,0	20,6	0,8

Tobermorito elementinės cheminės sudėties palyginamieji duomenys pateikiami 3.1 lentelėje. Palyginus aliuminio kiekius bandiniuose nustatyta, kad C10 bandinyje tobermortite buvo 5,8 % aliuminio kiekis, o etalono bandinio tobermorite – 1,7 %. E bandiniuose nustatytas mažesnis Si ir O elementų kiekis, palyginti su C10 bandiniais. Kadangi tobermorite su įterptu aliuminiu SiO_4^{2-} keičiamas Al^{3+} , atitinkamai keičiasi ir šių cheminių elementų kiekis (Schreiner ir kt., 2019).

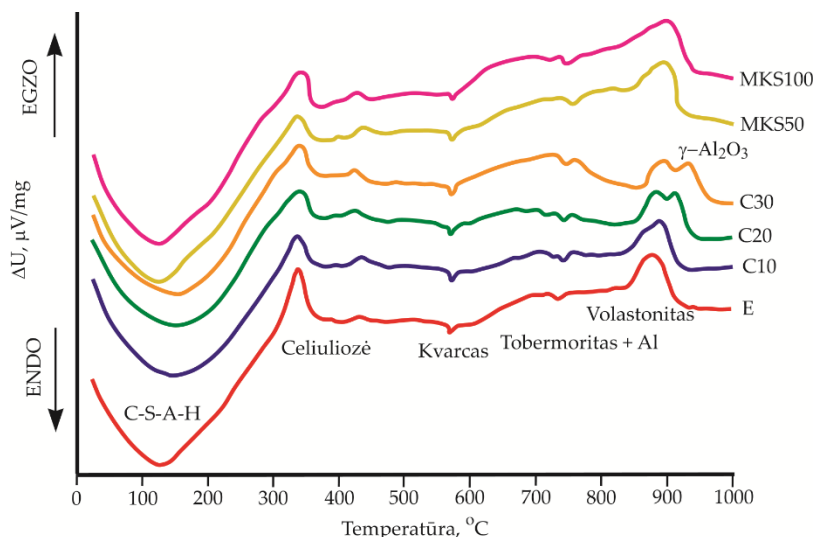
3.2.5. Terminės analizės tyrimai

Darbe, siekiant tiksliau įvertinti AFK makro- ir mikrostruktūros susidarymą, susidarančius hidratų ir dehidracijos kinetiką, atlikti terminės analizės tyrimai.

Buvo atlikti bandinių DTG ir TGA tyrimai (3.14 ir 3.15 pav.). Atlikus daugkartinius tyrimus su tais pačiais bandiniais, buvo gautas toks pat tyrimų rezultatas. Bendrieji masės nuostoliai 1000 °C temperatūroje svyruoja nuo 14,13 % iki 11 %. Nustatyti keli egzoterminiai efektai, kurie vyksta esant 350 °C, 420 °C, 880 °C ir 920–930 °C, ir du endoterminiai efektai, vykstantys 130–150 °C ir 571 °C temperatūroje.

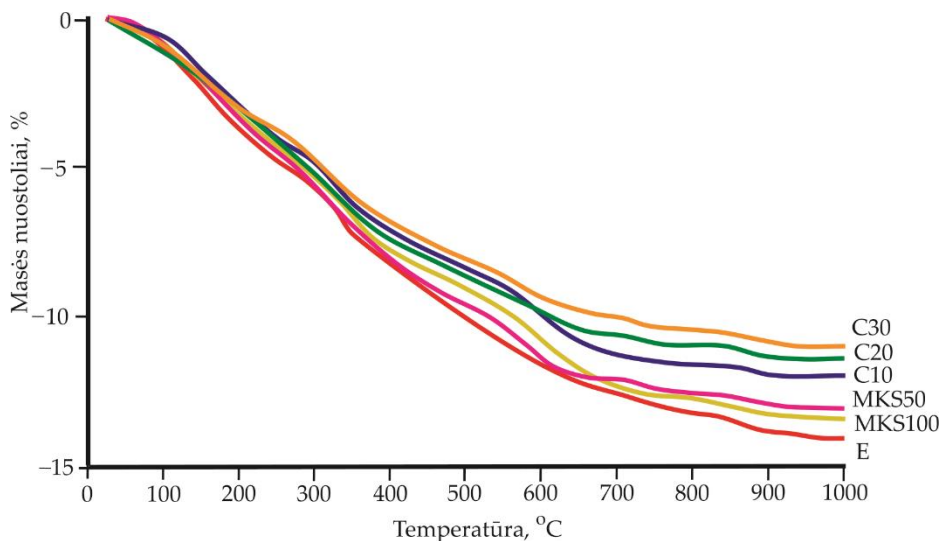
DTG rezultatai parodė, kad iki 300 °C vyksta absorbuotojo ir chemiškai surišo vandens pašalinimas bei nemažai kitų lygiagrečiai vykstančių ir persidengiančių procesų. Pagrindinis hidroterminio kietinimo metu susidaręs hidratas – 11 Å tobermoritas kristalizuojasi į 9 Å tobermoritą esant 240 °C. Al jonų turintis tobermoritas yra šiek tiek atsparesnis ir dehidratuoja esant 300 °C (Biagioni ir kt., 2016). Tame pačiame temperatūros diapazone vyksta CSH dehidratacija (iki 200 °C) ir susidariusių CSAH dehidratacija (hidrogarneto) (Hager, 2013). Taip pat dehidratuoja susidaręs katoitas. Visi šie perėjimai atskirai nėra fiksuojami terminės analizės metodu dėl kompleksinės bandinių sudėties. 330–340 °C temperatūroje yra nustatytas egzoterminis efektas.

Masės nuostolis nustatytas visuose bandiniuose ir yra susijęs su fibrocementu sudedamosios dalies – celiuliozės pluoštų terminė destrukcija. Visų tirtų bandinių masės nuostolis šiame etape yra panašus visuose bandiniuose ir sudaro ~4,5 %. Toliau fiksuojami tik tam tikri nežymūs egzoterminiai efektai 420–430 °C temperatūrose. Šie efektai yra nedideli ir gali būti siejami su galutiniu celiuliozės išdegimu (bandiniuose buvo naudota dviejų rūšių celiuliozė).



3.14 pav. AFK bandinių DTG rezultatai

Fig. 3.14. AFC samples DTG results



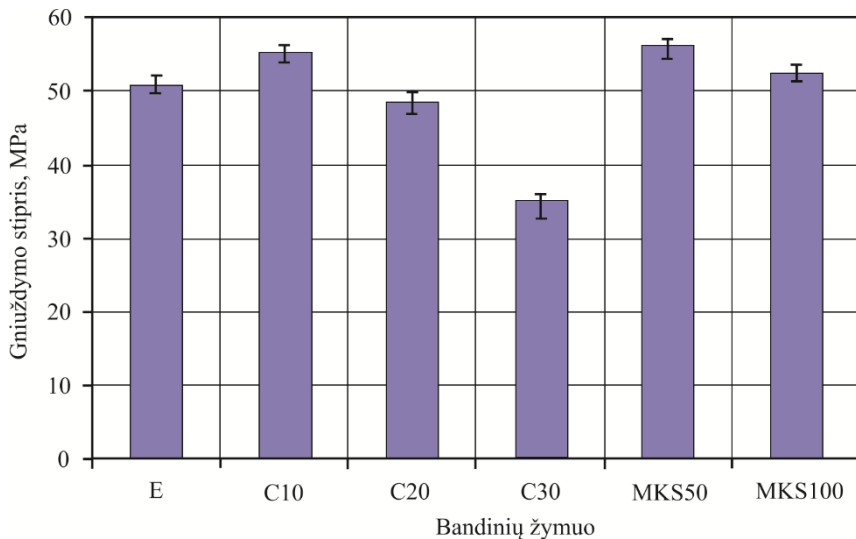
3.15 pav. AFK bandinių TGA rezultatai

Fig. 3.15. AFC samples' TGA results

Visuose bandiniuose, esant 573 °C temperatūrai, nustatytas endoterminis efektas, kurio metu įvyksta polimorfinis kvarco pokytis. Šis procesas nėra susijęs su masės nuostoliais. Nuo 650 °C išryškėja bandinių masės nuostolių skirtumai. Šioje temperatūroje prasideda CSH antrinė dehidratacija, kuri nėra aiškiai matoma (DeJong ir Ulm, 2007). Aukštesnėje temperatūroje prarandama tobermorito hidroksilo grupė. DTG tyrimuose tai nustatyta 720–730 °C temperatūroje, kai tobermoritas praranda hidroksilo grupę, pereina į metastabilią būseną ir įvyksta dehidroksilacija (Yang ir kt., 2014). E bandinyje esant 820 °C tobermoritas skyla į volastonitą. Tačiau bandiniuose, kur buvo panaudotas PGA priedas, tobermorito skilimas fiksuojamas esant 860 °C ir skyla į volastonitą. Tai patvirtina egzoterminis efektas, kuris nėra lydimas masės pokyčio (Yang ir kt., 2014). Aliuminio kiekis sistemoje turi įtakos tobermorito skilimo į volastonitą temperatūrai ir, esant aliuminio, temperatūra didėja (Guo ir kt., 2017). C20 ir C30 bandiniuose 920–940 °C temperatūroje fiksuojamas ryškus egzoterminis efektas, kai amorfinis Al_2O_3 pereina į $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ formą (Ptáček ir kt., 2011). Bandiniai C30 ir C20 turi mažiausius galutinius masės nuostolius, o tai siejama su hidratų kiekio sudarymu. Šis kiekis yra mažesnis dėl mažesnio cemento kiekio. DTG ir TGA tyrimai neparodė esminių skirtumų tarp bandiniuose vykstančių efektų, tai gali būti dėl bandiniams formuoti naudojamos kompleksinės mišinio sudėties. Tačiau bandinių, kur kaip priedas buvo panaudotas PGA, termogramose, tam tikruose temperatūros diapazonuose, matomas didesnis atsparumas aukštoms temperatūroms.

3.2.6. Mechaninių savybių tyrimai

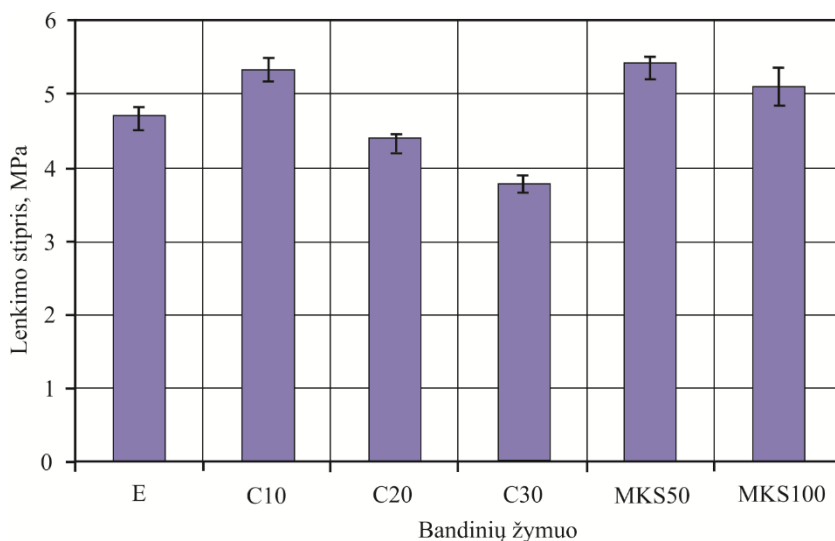
Buvo įvertintas PGA poveikis AFK mechaninėms savybėms. Gniuždymo stiprio tyrimo rezultatai parodė, kad C10, MKS50 ir MKS100 bandinių gniuždymo stipris buvo didesnis nei E bandinių stipris (3.16 pav.). Didžiausias gniuždymo stipris buvo nustatytas MKS50 bandiniuose ir buvo 11,1 % didesnis nei E bandinių stipris. Panašūs rezultatai gauti ir C10 bei MKS100 bandiniuose. Nustatytas vidutinis šių bandinių gniuždymo stipris buvo atitinkamai 9,1 % ir 4,3 % didesnis nei E bandinių stipris. C20 bandinių gniuždymo stipris buvo 4,9 % mažesnis. Ryškus bandinių gniuždymo stiprio sumažėjimas buvo nustatytas C30 bandiniuose ir siekė 31,2 %.



3.16 pav. Vidutinis gniuždymo stipris

Fig. 3.16. Average compressive strength

Lenkimo stiprio bandymų rezultatai (3.17 pav.), taip pat kaip ir gniuždymo stiprio bandymų rezultatai, parodė, kad C10, MKS50 ir MKS100 bandinių lenkimo stipris buvo didesnis negu E bandinių stipris. Didžiausias vidutinis lenkimo stipris buvo nustatytas taip pat MKS50 bandiniuose ir buvo 14,9 % didesnis negu E bandinių stipris. C10 ir MKS100 bandiniuose nustatytas vidutinis lenkimo stipris buvo atitinkamai 12,8 % ir 8,5 % didesnis. C20 bandinių lenkimo stipris buvo 6,3 % mažesnis. Didžiausias lenkimo stiprio sumažėjimas buvo nustatytas C30 bandiniuose, jis siekė 19,1 %.



3.17 pav. Vidutinis lenkimo stipris

Fig. 3.17. Average flexural strength

Gniuždymo stiprio bandymų tyrimo rezultatai parodė, kad PGA priedas didina AFK bandinių gniuždymo stiprį. Tai susiję su tankios mikrostruktūros formavimu, kai kompleksiskai tam poveikį daro tobermorito su įterptu aliuminiu ir CSH bei jų formavimosi ypatumai. Įtakos turi ir naudojamas maltas kvarcinis smėlis bei karkasą sudarantis nemaltas kvarcinis smėlis. PGA priedas vietoje cemento ar malto kvarcinio smėlio nuo 4,3 % iki 11,1 % padidino gniuždymo stiprį, palyginti su E bandiniais. Didžiausias efektas pasiektas tada, kai PGA priedas sudarė 3,8 % ir 5 % nuo bendrosios fibrocementų medžiagos masės. Manoma, kad bandinių C20 ir C30 prastesnius gniuždymo stiprio rezultatus lėmė sumažėjęs cemento kiekis. Atkreipiamas dėmesys, kad C20 bandiniai turėjo santykinai didelį PGA kiekį, palyginti su cemento kiekiu, ir teoriškai neturėjo sudaryti stiprios struktūros. Tačiau gniuždymo stiprio bandymai parodė, kad C20 bandinių stipris tik 4,9 % mažesnis už E bandinių stiprio rezultatus. Palyginimui, C30 stiprio rezultatai procentine išraiška buvo 31,2 % mažesnis už E bandinių. Daroma prielaida, kad C20 bandiniuose esamas maltas kvarcinis smėlis užpildė mikroporas ir sudarė su kitais hidratais tvirtą mikrostruktūrą.

Lyginant lenkimo stiprio bandymų rezultatus su gniuždymo stiprio bandymo rezultatais, matyti tos pačios tendencijos. Todėl daroma išvada, kad lenkimo stiprio bandymų rezultatai gali būti paaiškinami taip pat kaip ir aprašyti gniuždymo stiprio bandymų rezultatai.

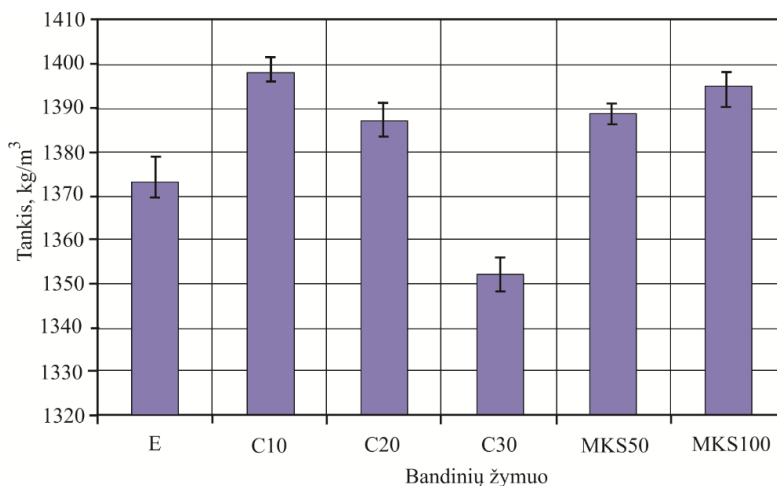
3.3. Atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, poveikis autoklavinio fibrocementu savybėms po standartinio gaisro temperatūros poveikio

Šiame skyriuje tiriamų bandinių sudėtis aprašyta antrajame skyriuje (2.15 lentelėje). Tiriama sudėtis bandinių C10, C20, C30, kuriuose dalis cemento buvo pakeista į atlieką, susidarančią gaminant putstiklio granules Taip pat MKS50 ir MKS100 bandiniai, kur maltas kvarcinis smėlis buvo keičiamas atliekos, susidarančios gaminant putstiklio granules, priedu. Šiame skyriuje siekiama įvertinti priedo poveikį aukšta temperatūra veikiamiems bandiniams. Aukštos temperatūros parinkimo pagrindimas aprašytas pirmajame skyriuje. Standartinio gaisro temperatūros aplinka tiriamiems bandiniams buvo sukuriamą pagal 2.3 poskyryje aprašytą sąlygą. Po 30 min bandymo temperatūra siekė 841 °C. Šiame skyriuje įvertinti paveiktų standartinio gaisro temperatūra bandinių tankio, ultragarso impulso sklaidimo greičio ir ilgalaikio vandens įgėrio tyrimų rezultatai. Optinės ir elektroninės skenuojamosios mikroskopijos metodais gauti mikro- ir makrostruktūros rezultatai parodė aukštos temperatūros destruktinį poveikį ir priedo įtaką. Atliktų mechaninių savybių tyrimų rezultatų analizė parodė, kad priedo panaudojimas gali padidinti mechanines savybes. Nustatytos fizikinių ir mechaninių savybių priklausomybės ir tendencijos priklausomai nuo panaudotojo priedo kiekio ir keičiamojo komponento, įvertinus standartinio gaisro temperatūros poveikį.

3.3.1. Tankio tyrimai po standartinio gaisro poveikio

Bandinių tankio tyrimo rezultatai po standartinio gaisro temperatūros poveikio yra pateikiami 3.18 pav.

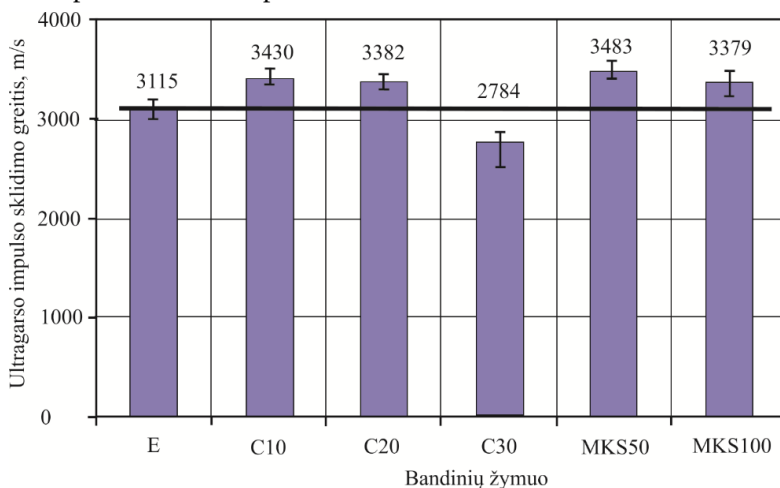
Tankio tyrimų po standartinio gaisro temperatūros poveikio tendencijos skiriasi nuo iki tol gautų tankio tendencijų. Įprastu atveju nustatyta, kad PGA mažina bandinių tankį, tačiau po aukštos temperatūros poveikio dauguma bandinių su PGA turėjo didesnę tankį nei E bandiniai. E bandinių vidutinis tankis buvo 1373 kg/m³, o didžiausias 1398 kg/m³ vidutinis tankis nustatytas C10 bandiniuose ir didėjo 1,8 %, kas galėtų būti vertinama paklaidos ribose. Standartinio gaisro temperatūros poveikis bandinių mikrostruktūrai buvo destruktinis. Vykstant vandens pašalinimui, dehidracijai, polimorfiniams virsmams ir sukeltiems temperatūriniais įtempiais, bandinių mikrostruktūra tapo mažiau tanki. Palyginus bandinių, paveiktų standartinio gaisro temperatūros poveikio, tankius su bandinių tankiais, kurie nebuvo veikiami gaisro, šios savybės kitimo tendencijos yra tokios pačios. Didesnis už E bandinių tankį nustatytas C10, MKS100 ir MKS50 bandinių tankis.



3.18 pav. Bandinių vidutinis tankis po standartinio gaisro temperatūros poveikio
Fig. 3.18. Samples' average density after the standard fire temperature exposure

3.3.2. Ultragarso impulso sklaidimo greičio tyrimai po standartinio gaisro poveikio

Cementinių medžiagų, veikiant aukštai temperatūrai, mikrostruktūroje atsiranda įtrūkių, porų ir kitų defektų, dėl to UIG mažėja. AFK bandinių su PGA priedu UIG rezultatai pateikiami 3.19 pav.



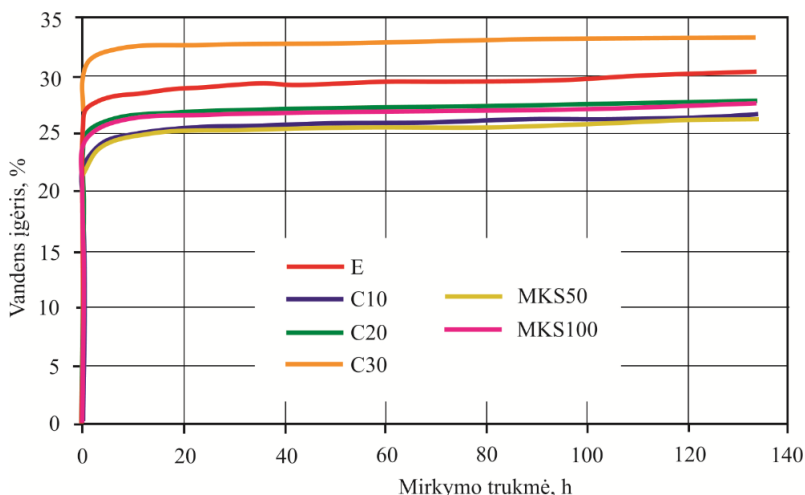
3.19 pav. Bandinių UIG po standartinio gaisro temperatūros poveikio
Fig. 3.19. Samples of ultrasonic impulse spreading speed after standard fire temperature exposure

Po standartinio gaisro poveikio visų bandinių su PGA priedu, išskyrus C30 bandinių, UIG rezultatai buvo didesni nei E bandinių. Didžiausias vidutinis 3483 m/s UIG buvo nustatytas MKS50 bandiniuose, ir tai yra 11,9 % daugiau negu E bandiniuose. Mažiausias UIG buvo C30 bandiniuose, ir tai 10,6 % mažiau negu E bandiniuose.

Galima teigti, kad PGA AFK bandiniuose po standartinio gaisro temperatūros poveikio didina bandinių UIG bendruoju atveju, tačiau, esant dideliame PGA kiekiui, nustatytas atvirkštinis šio priedo poveikis. Tai gali būti paaiškinama bandinių mikro- ir makrostruktūros stiprumu, kuris priklauso nuo standartinio gaisro temperatūros poveikio. Bandiniai su pertekliniu PGA kiekiu (C30) neturėjo stiprios mikrostruktūros iki standartinio gaisro temperatūros poveikio (3.16 ir 3.17 pav.), todėl aukšta gaisro temperatūra dar labiau paveikė mikrostruktūrą, dėl ko atsirado didesnis mikro- ir makro- įtrūkių skaičius, ir tai galėjo lemti mažiausią nustatytą C30 bandinių tankį.

3.3.3. Ilgalaikio vandens įgėrio tyrimai po standartinio gaisro poveikio

Aukštos temperatūros poveikis ilgalaikio vandens įgėrio rezultatams toks pats reikšmingas, kaip ir UIG. Mikrostruktūroje susidarę įtrūkiai ir poros absorbuoja didesnę vandens. Ilgalaikio vandens įgėrio rezultatai pateikiami 3.20 pav.



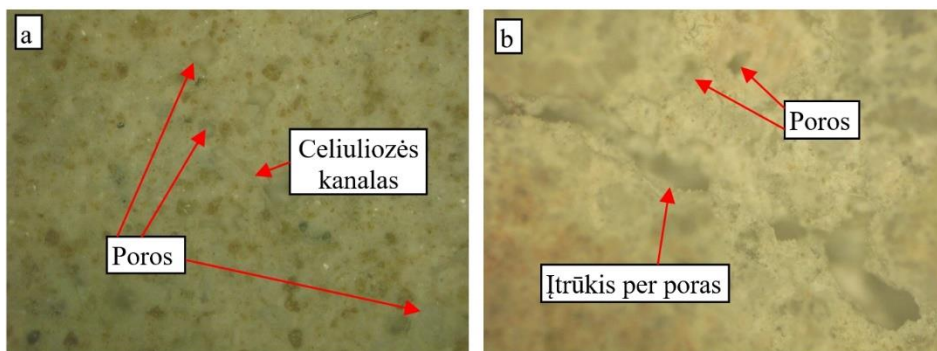
3.20 pav. Bandinių ilgalaikis vandens įgėris po standartinio gaisro temperatūros poveikio

Fig. 3.20. Samples of long-term water absorption after standard fire temperature exposure

Palyginus nepaveiktą temperatūra bandinių vandens įgėrį, matyti, kad jis po standartinio gaisro poveikio padidėjo visuose bandiniuose. Ilgalaikio vandens įgėrio tendencijos, palyginti su standartinio gaisro temperatūros poveikio nepaveiktais bandiniais, išliko panašios. Tik C20 bandiniuose nustatytas ryškesnis įgėrio verčių skirtumas, palyginti su E bandinių vertėmis iki bandinių terminio poveikio. Iki standartinio gaisro temperatūros poveikio E ir C20 bandinių ilgalaikis vandens įgėris buvo panašus – atitinkamai 17,92 % ir 17,62 %. Po standartinio gaisro temperatūros poveikio šių bandinių įgėris buvo atitinkamai 30,15 % ir 27,63 %. Tai susiję su C20 bandiniuose esančiu nesureagavusiu PGA, kurio terminis skilimas vyksta aukštesnėje nei standartinio gaisro temperatūroje. Dėl terminio poveikio neskilęs PGA lieka mikrostruktūroje ir mažina vandens įgėrį.

3.2.4. Makro- ir mikrostruktūros tyrimai po standartinio gaisro poveikio

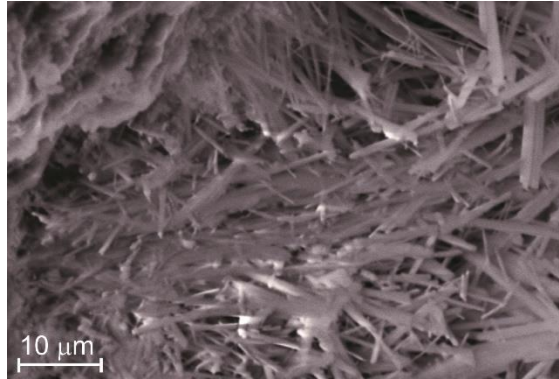
Makrostruktūros tyrimai su optiniu mikroskopu parodė makrostruktūros temperatūrinius defektus, vizualiai matomą porų pokytį bandiniuose. Prieš tai atlikta literatūros analizė ir eksperimentiniai tyrimai parodė, kad PGA didina porų kiekį bandiniuose. Šios poros gali veikti dvejopai. Veikia teigiamai, kai pora gali būti šalinamų iš mikrostruktūros vandens garų rezervuaru, kuris leidžia vandens garams užpildyti jos tūrį, taip nesukeliant papildomų destruktinių įtempių kompozito matricoje. Tačiau didelis porų kiekis sumažina mikrostruktūros vientisumą, o tai neigiamai veikia mechaninės savybės. Makrostruktūros vaizdas pateikiamas 3.21 pav.



3.21 pav. Bandinių makrostruktūra po standartinio gaisro temperatūros poveikio (100 kartų didinimas): E bandinys (a), C30 bandinys (b)

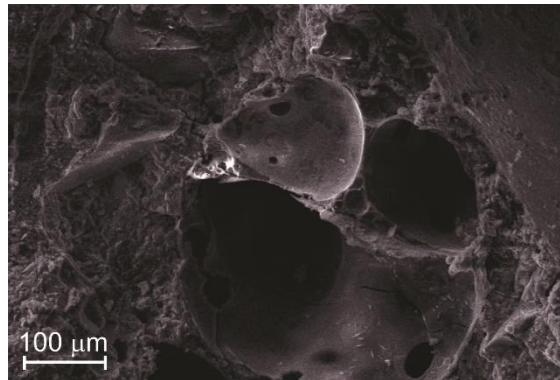
Fig. 3.21. Samples' macro structure after standard fire temperature exposure (zoomed-in 100 times): E sample (a), C30 sample (b)

Atlikti SEM tyrimai leido įvertinti PGA poveikį AFK mikrostruktūrai. Be 3.2.4 poskyryje įvardinto pagrindinio hidrato – tobermorito, po gaisro temperatūros poveikio dažnai aptinkamas jo skilimo produktas volastonitas (3.22 pav.).



3.22 pav. Volastonitas E bandinio mikrostruktūroje (5000 kartų didinimas)
Fig. 3.22. Wollastonite in E sample's micro-structure (zoomed-in 5000 times)

Koncentruotas porų kiekis nedideliame plote susilpnina AFK bandinio mikrostruktūrą, kuri pateikiama 3.23 pav. Anksčiau darbe buvo minėta, kad PGA didina cementinių medžiagų poringumą.



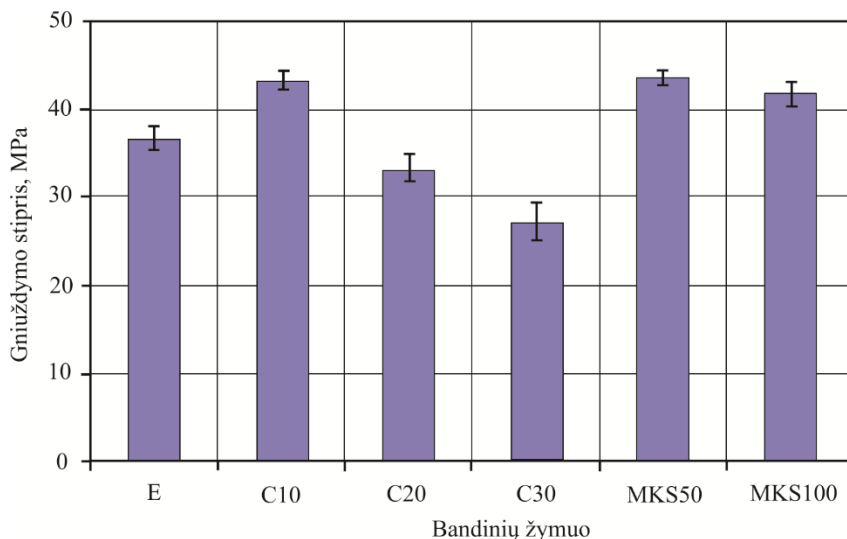
3.23 pav. C30 bandinio mikrostruktūra po standartinio gaisro temperatūros poveikio (5000 kartų didinimas)

Fig. 3.23. Microstructure of C30 sample after the standard fire temperature exposure (zoomed-in 5000 times)

Mikro- ir makrostruktūros tyrimai parodė destrukcinį standartinio gaisro temperatūros poveikį. Dėl aukštos temperatūros poveikio bandinių mikro- ir makrostruktūroje atsirado įtrūkių. Labiau porėtuose bandiniuose C30 įtrūkiai buvo ir tarp porų, dėl to dar labiau pablogėja tokių bandinių mechaninės savybės.

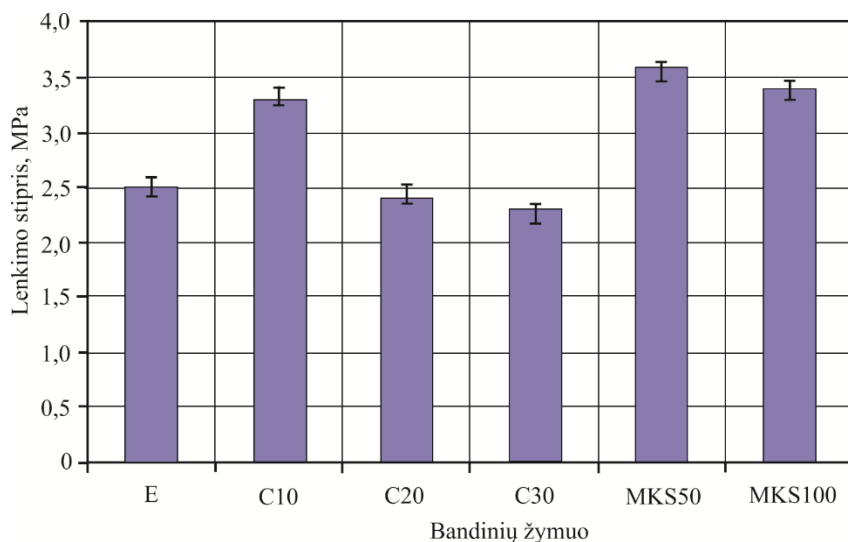
3.2.5. Mechaninių savybių tyrimai po standartinio gaisro poveikio

Mechaninių savybių bandymų rezultatai po standartinio gaisro poveikio gali būti paaiškinami vertinant bandinių mikro- ir makrostruktūrų susidarymą bei pagrindinių sudedamųjų fibrocemento komponentų ir hidratų elgseną aukštoje temperatūroje. Vertinat gniuždymo stiprį, C10, MKS50 ir MKS100 bandiniai įprastosiomis sąlygomis parodė didžiausius šios charakteristikos rezultatus. C20 bandiniai po standartinio gaisro poveikio turėjo procentaliai didžiausią gniuždymo stiprio praradimą – 30,9 %. Kadangi formuojant šių bandinių struktūrą dalyvavo maltas kvarcinis smėlis, jis, užpildydamas mikroporas, aukštoje temperatūroje po polimorfinio kvarco pokyčio galėjo susilpninti tankią mikrostruktūrą, taip susilpnindamas visos medžiagos stiprį. Gniuždymo stiprio nustatymo bandymo rezultatai pateikiami 3.24 pav.



3.24 pav. Vidutiniai gniuždymo stipriai po standartinio gaisro temperatūros poveikio

Fig. 3.24. Average compressive strength after standard fire temperature exposure



3.25 pav. Vidutinis lenkimo stipris po standartinio gaisro temperatūros poveikio

Fig. 3.25. Average flexural strength after standard fire temperature exposure

Lenkimo stiprio bandymų rezultatų pokyčių tendencijos nesiskyrė nuo gniuždymo stiprio rezultatų. Didžiausias vidutinis lenkimo stipris buvo nustatytas MKS50 bandiniams ir buvo 3,6 MPa, o tai 44 % daugiau nei E bandiniuose. Kiti bandiniai MKS100 ir C10 taip pat turėjo geresnius rezultatus, šie buvo atitinkamai 3,4 MPa ir 3,3 MPa. Bandiniai, kuriuose buvo panaudotas didesnis PGA kiekis C20 ir C30, turėjo mažesnę vidutinę lenkimo stiprį, atitinkamai 2,4 MPa ir 2,3 MPa.

Prastas C20 ir C30 bandinių mechanines savybes lėmė palyginti mažas cemento kiekis bandiniuose. Dėl šios priežasties mažėja CSH hidratų kiekis matricoje. Taip pat šiuose bandiniuose bus mažiau ir tobermorito, kuris turi tiesioginės įtakos bandinių mechaninėms savybėms (3.14 pav.).

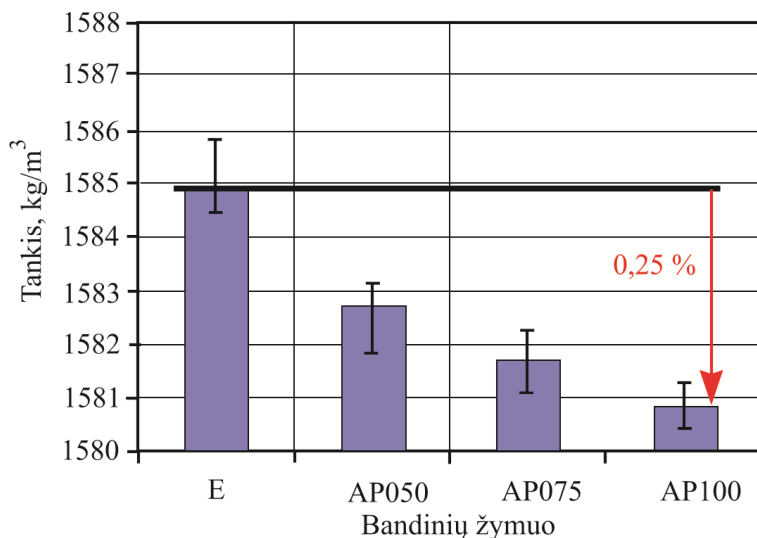
3.4. Anglies plaušo poveikis autoklavinio fibrocementito savybėms iki standartinio gaisro temperatūros poveikio

Šiame poskyryje tiriamų bandinių sudėtis aprašyta antrajame skyriuje (2.15 lentelėje). Tiriama sudėtis bandinių AP050, AP075, AP100, kuriuose dalis celiuliozės plaušo buvo pakeista anglies plaušo priedu. Šiame skyriuje tiriamų bandinių

sudėtis aprašyta antrajame skyriuje (2.15 lentelėje). Keičiamojo komponento kiekiai buvo parinkti atsižvelgiant į atliktą mokslinės literatūros analizę, kuri aprašyta pirmajame skyriuje. Siekiant įvertinti priedo poveikį mikrostruktūrai, įvertintas bandinių tankis. Išnagrinėjus ultragarso impulso sklaidimo greičio ir ilgalaikio vandens įgėrio tyrimo rezultatus, įvertinta bandinių mikrostruktūra ir poringumas. Šiame skyriuje išanalizuota bandinių mikro- ir makrostruktūra, panaudojus optinės ir elektroninės skenuojamosios mikroskopijos tyrimo metu gautus rezultatus. Šie rezultatai parodė priedo ir celiuliozės pluošto išikomponavimą į mikrostruktūrą, priedo ir cementinės matricos kontakto zoną. Atlikta mechaninių savybių tyrimų rezultatų analizė. Nustatytos fizikinių ir mechaninių savybių priklausomybės ir tendencijos priklausomai nuo panaudoto priedo kiekio ir keičiamojo komponento.

3.4.1. Tankio tyrimai

Tankio rezultatai, kai formavimo mišinyje buvo panaudotas AP, pateikti 3.26 pav.



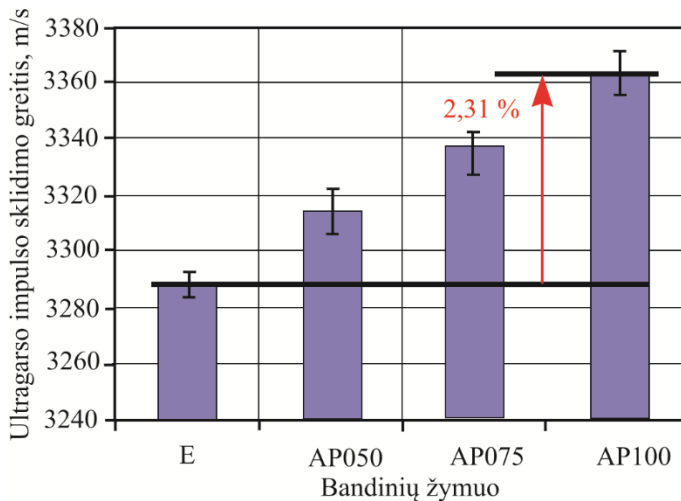
3.26 pav. Vidutinis bandinių tankis
Fig. 3.26. The average density of samples

Matoma, kad maksimalus skirtumas tarp bandinių yra 4 kg/m^3 , kas gali būti priskiriama paklaidai. Kadangi keičiamas AP bandiniuose sudėtinių medžiagų kiekis buvo nedidelis ir tai sudarė ne daugiau nei 1 % nuo bendrosios masės, aki-vaizdžių skirtumų, nagrinėjant bandinių tankį, nenustatyta. Žinoma, kad celiuliozės tankis yra $\sim 1,5 \text{ g/cm}^3$ (Woodhams ir kt., 1984), o AP tankis būna 1,74–

2,19 g/cm³ ribose (Mirdehghan, 2021). Nors tankio tyrimo rezultatai parodė nežymią tendenciją tankiui mažėti, tai negali būti vertinama kaip akivaizdi priklausomybė dėl galimos paklaidos ribos. Panašius rezultatus savo darbe pateikia mokslininkas Zegardlo (2022).

3.4.2. Ultragarso impulso sklaidimo greičio tyrimai

Didinant AP priedo kiekį, bandiniuose šiek tiek didėja UIG. Didžiausias padidėjimas nustatytas tiriant AP100 bandinius. Buvo nustatytas 3364 m/s UIG, o tai sudaro 2,31 % prieaugį, palyginti su 3288 m/s greičiu E bandiniuose. Kituose tiriuose bandiniuose UIG procentalus padidėjimas, palyginti su E bandiniais, buvo dar mažesnis. Toks nedidelis pokytis nuo E bandinių vidutinės vertės gali reikšti, kad iš emės AP priedas neturi didelės įtakos UIG. UIG bandymų rezultatai pateikiami 3.27 pav.



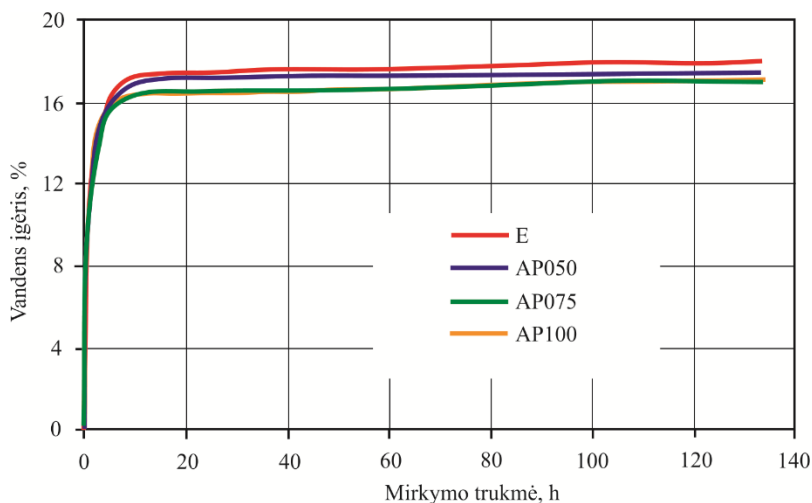
3.27 pav. Vidutinis bandinių impulso UIG

Fig. 3.27. The average speed of ultrasonic impulse spreading of samples

UIG tyrimai parodė, kad didinant AP kiekį bandiniuose UIG didėja. Tai gali būti susiję su AP plaušelių dydžiu. Šis plaušas yra kompaktiškesnis ir plonesnis už celiuliozės plaušą. Turėdamas tokias savybes AP labiau tankina bandinius negu celiuliozės pluoštas, be to, rezultatams įtakos turi ir šių priedų tankis. Negalima teigti, kad, didinant AP priedą, akivaizdžiai tankinama ir AFK bandinių struktūra, nes rezultatai gali būti vertinami paklaidos ribose, bet kiekybinės šių bandymų rezultatų reikšmės išryškėja palyginus su bandinių tankio nustatymo rezultatais.

3.4.3. Ilgalaikio vandens įgėrio tyrimai

Tyrimo rezultatai parodė, kad bandiniai su AP priedu turėjo mažesnę vandens įgėrį, palyginti su E partijos bandiniais. Skirtumas tarp tirtų bandinių nebuvo didelis, jis siekia 4,3 %. Šie rezultatai gali būti paaiškinami natūralios celiuliozės pluošto vandens absorbcijos savybėmis, kurios daugumoje atvejų pasižymi didesne vandens absorbcija už sintetinių plaušų (Espert ir kt., 2004), o nedidelis keičiamas priedų kiekis parodo nežymius pokyčius. Ilgalaikio vandens įgėrio rezultatai pateikiami 3.28 pav.



3.28 pav. Bandinių ilgalaikis vandens įgėris
Fig. 3.28. Samples of long-term water absorption

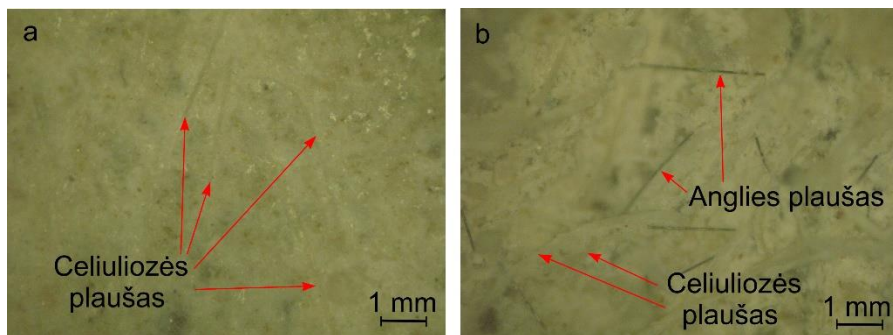
Palyginti AP su iš dalies pakeistu celiuliozės pluošto mišiniu, šis priedas turi didesnę vandens įgėrį. Tai galėtų turėti įtakos cementinių medžiagų hidratacijos procesui. Įgertasis vanduo laiko atžvilgiu celiuliozės pluošte pasiskirsto tolygiau cemento hidratacijos proceso metu. Žinoma, kad porų kiekis taip pat turi reikšmės cementinių medžiagų mechaninėms savybėms, tačiau šių tyrimų metu medžiagų poringumas ir jo pokytis priklausomai nuo panaudotų medžiagų nebuvo nuodugniai ištirtas. Detaliau bandinių poringumas buvo tiriamas SEM ir OM metodais.

3.4.4. Mikro- ir makrostruktūros tyrimai

Optiniu mikroskopu, didinant vaizdą 100 kartų, ištirta AP bandinių makrostruktūra. Jos vaizdas pateikiamas 3.29 pav. Nustatyta, kad AP įsikomponuoja į AFK

bandinio struktūrą tarp celiuliozės pluošto. 3.30 pav. pateikiami SEM atlikti tyrimai, kuriuose matomas kompaktiškas AP armavimo plaušelių įsikomponavimas į mikrostruktūrą.

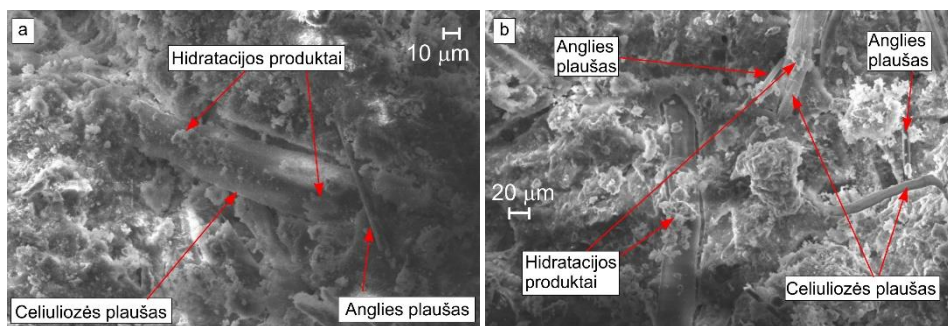
Sistemiškai interpretuoti gautus rezultatus reikia pradedant nuo mikro- ir makrostruktūros formavimo. Kadangi buvo žinoma, kad hidratacijos metu AP nesudaro naujų cementinės medžiagos, tai struktūros formavimui buvo panaudoti atitinkami AP įmaišymo sprendiniai. Kvarcinio smėlio kiekis įprastai yra didesnis už AP kiekį (Callister, 2006), todėl bandinių maišymas buvo pradedamas nuo kvarcinio smėlio (M300) maišymo su AP.



3.29 pav. Bandinių makrostruktūra (100 kartų didinimas):

E bandinys (a), AP050 bandinys (b)

Fig. 3.29. Samples' macro-structure (zoomed in 100 times): E sample (a), AP050 sample (b)

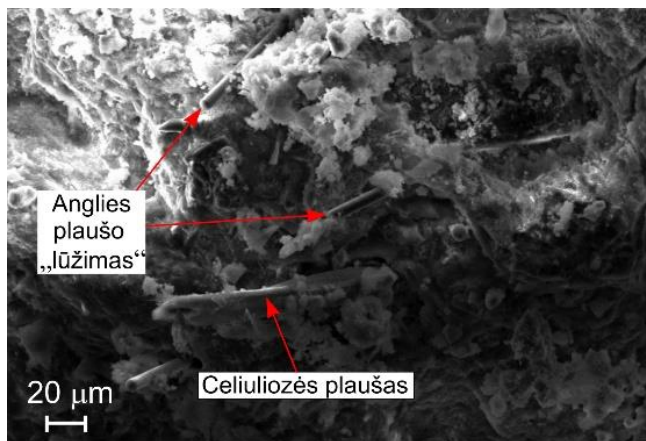


3.30 pav. Bandinių mikrostruktūra (3000 kartų didinimas):

AP050 bandinys (a), AP100 bandinys (b)

Fig. 3.30. Samples' micro-structure (zoomed in 3000 times): AP050 sample (a), AP100 sample (b)

Buvo siekiama, kad ant AP paviršiaus susidarytų įbrėžimai, kurie padidintų AP ir cementinės matricos sukibimą (Pei ir kt., 2015). Tačiau, atliekant SEM tyrimus, jokių įbrėžimų ar hidratų formavimosi centrų aplink AP nepastebėta. Pastebėta, kad celiuliozės plaušelių paviršiuje susidaro daugiau hidratų, palyginti su AP paviršiumi (3.30 pav.). Kadangi celiuliozė įgeria vandenį, šis gali dalyvauti cemento hidratacijos procese. Tai gali lemti ir hidratų formavimąsi ant celiuliozės plaušelių bei stiprios kontaktinės zonos su cementine matrica susidarymą.

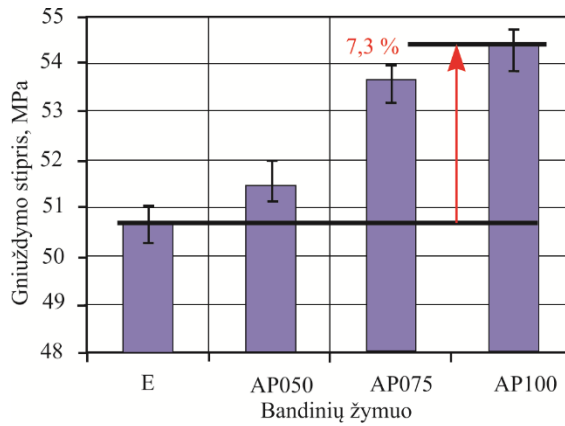


3.31 pav. AP100 bandinio mikrostruktūra (3000 kartų didinimas)
Fig. 3.31. AP100 sample's microstructure (zoomed in 3000 times)

Mikrostruktūros AP050, AP075 ir AP100 bandinių tyrimai po mechaninio poveikio parodė, kad kai kurie AP „lūžta“ (3.31 pav.). Tokia AP elgsena bandinyje leidžia daryti prielaidą, kad tam tikrose vietose AP stipriai įsikomponuoja į cementinę matricą. 3.30 pav. matoma, kad AP papildė celiuliozės armuojantįjį poveikį. AP įsiterpia tarp celiuliozės šoninių plaušų taip sustiprindamas celiuliozės armavimo tinklą.

3.2.5. Mechaninių savybių tyrimai

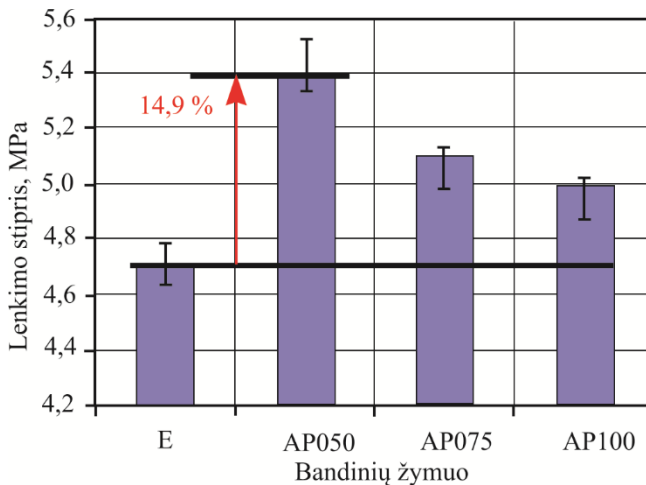
AP050, AP075 ir AP100 bandinių gniuždymo stipris buvo didesnis už E bandinių stiprį (3.32 pav.). Didžiausias vidutinis gniuždymo stipris buvo nustatytas AP100 bandiniuose – 54,4 MPa, ir tai 7,3 % daugiau nei E bandiniuose. Bandiniuose su AP priedu vidutinis gniuždymo stipris buvo nuo 51,5 MPa iki 54,4 MPa.



3.32 pav. Gniuždymo stiprio nustatymo rezultatai

Fig. 3.32. Compressive strength results

Lenkimo stiprio nustatymo rezultatai taip pat parodė, kad AP naudojimas AFK gerina šios charakteristikos rodiklius (3.33 pav.). Šiuo atveju didžiausias vidutinis lenkimo stipris buvo nustatytas AP050 bandiniams, jis buvo 5,4 MPa. AP075 bandiniams nustatytas 5,1 MPa vidutinis lenkimo stipris, o AP100 – 5 MPa. E bandinių vidutinis lenkimo stipris buvo 4,7 MPa, ir tai 14,9 % mažiau už AP050 bandinius.



3.33 pav. Lenkimo stiprio nustatymo rezultatai

Fig. 3.33. Flexural strength results

Bandinių gniuždymo stiprio nustatymo rezultatai parodė, kad AP priedas, esant aplinkos temperatūrai, nestipriai didina gniuždymo stiprį. Ryškiausias vidutinio gniuždymo stiprio padidėjimas buvo nustatytas AP100 bandiniuose, ir tai buvo 7,3 % daugiau negu E bandiniuose. Gniuždymo stipriui didelę įtaką turi tankios mikrostruktūros susidarymas. AFK kompozito kietėjimo metu susidaro CSH (tobermoritas), CASH ir kiti hidratacijos produktai, AP įsikomponuoja į mikrostruktūrą. Tai iš esmės ir yra viena iš pagrindinių priežasčių, dėl ko gniuždymo stiprio rezultatai šiek tiek padidėjo.

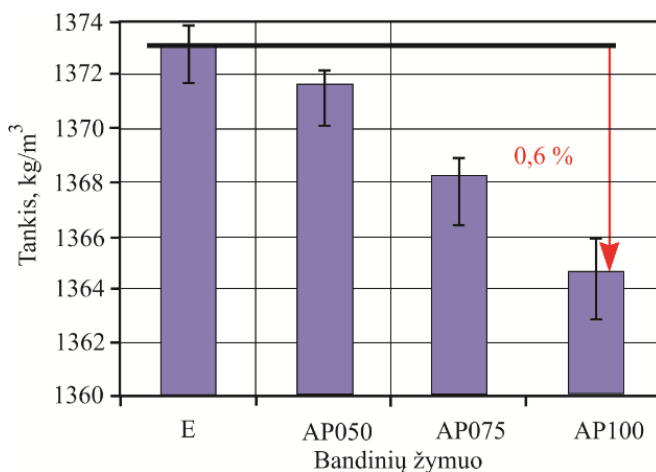
Lenkimo stiprio rezultatai, palyginti su gniuždymo stiprio rezultatais, turėjo panašias tendencijas ir dėsningumus. Aplinkos temperatūroje bandiniai su AP priedu turėjo didesnę lenkimo stiprį nei E bandiniai. Minėta, kad AP priedas įsikomponuoja į tankią kompozito struktūrą, kurioje papildomai persipina su celiuliozės plaušais (3.30 pav.), sustiprindamas armavimo tinklą. Toks kompleksinis įvairių pluoštinių priedų panaudojimas duoda geresnius lenkimo stiprio rezultatus, nors ir AP priedo maišymas su kvarciniu smėliu nepaveikė AP paviršiaus. 14,9 % didesnis vidutinis lenkimo stipris buvo nustatytas AP100 bandiniuose, palyginti su E bandiniais.

3.5. Anglies plaušo poveikis autoklavinio fibrocementa savybėms po standartinio gaisro temperatūros poveikio

Šiame poskyryje tiriamų bandinių sudėtis aprašyta antrajame skyriuje (2.15 lentelėje). Tiriama sudėtis bandinių AP050, AP075, AP100, kuriuose dalis celiuliozės plaušo buvo pakeista anglies plaušo priedu. Šiame skyriuje tiriamų bandinių sudėtis aprašyta antrajame skyriuje (2.15 lentelėje). Aukštos temperatūros parinkimo pagrindimas aprašytas pirmajame skyriuje. Standartinio gaisro temperatūros aplinka tiriamiems bandiniams buvo sukurama pagal 2.3 poskyryje aprašytas sąlygas. Po 30 min bandymo temperatūra siekė 841 °C. Šiame skyriuje įvertinti paveiktų standartinio gaisro temperatūra bandinių tankio, ultragarso impulso sklaidimo greičio ir ilgalaikio vandens įgėrio tyrimų rezultatai. Optinės ir elektroninės skenuojamosios mikroskopijos metodais gauti mikro- ir makrostruktūros rezultatai parodė aukštos temperatūros destruktinį poveikį ir priedo įtaką. Nustatyta, kad kontaktas tarp cementinės matricos ir priedo sumažėja, o tai lemia priedo terminis susitraukimas, kuris įvyksta standartinio gaisro temperatūros ribose. Atliktų mechaninių savybių tyrimų rezultatų analizė parodė, kad priedo panaudojimas gali pagerinti mechanines savybes. Nustatytos fizikinių ir mechaninių savybių priklausomybės ir tendencijos priklausomai nuo panaudoto priedo kiekio ir keičiamojo komponento, įvertinus standartinio gaisro temperatūros poveikį.

3.5.1. Tankio tyrimai po standartinio gaisro poveikio

Po standartinio gaisro temperatūros poveikio buvo tiriamas AP050, AP075, AP100 bandinių tankis. Šie rezultatai pateikiami 3.34 pav.

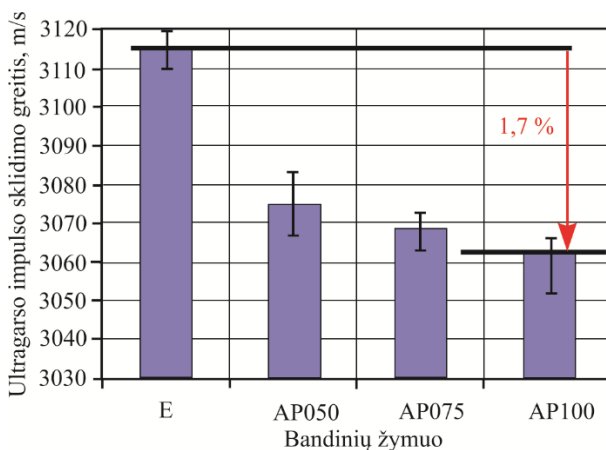


3.4 pav. Bandinių tankis po standartinio gaisro temperatūros poveikio
Fig. 3.34. Samples' density after standard fire temperature exposure

Nustatyti bandinių tankio rezultatai yra panašūs, palyginti su įprastomis sąlygomis atliktais tų pačių bandinių tyrimo rezultatais. Nustatyta, kad visų AFK bandinių tankis sumažėjo, juose panaudojus AP priedą. Mažiausias vidutinis tankis nustatytas AP100 bandiniuose, jis buvo 1365 kg/m^2 . E bandinių vidutinis tankis po aukštos temperatūros poveikio buvo 1373 kg/m^3 . Visų bandinių tankio sumažėjimą lėmė dehidratacijos procesas ir celiuliozės išdegimas bandiniuose. Skirtumas tarp vidutinių bandinių tankio rezultatų yra 8 kg/m^3 , šis skirtumas yra toks nedidelis, kad gali būti paklaidos ribose. Vertinant šių bandymų rezultatus, negalima vienareikšmiškai teigti, kad AP mažina AFK tankį po standartinio gaisro temperatūros poveikio.

3.5.2. Ultragarso impulso sklaidimo greičio tyrimai po standartinio gaisro poveikio

UIG tyrimai parodė ryškesnius skirtumus tarp kontrolinio bandinio ir bandinių su AP priedu. Nustatytas vidutinis E bandinių UIG 3115 m/s . Bandinių su AP priedu vidutinis UIG buvo tarp 3075 m/s ir 3063 m/s . Tyrimo rezultatai pateikiami 3.35 pav.



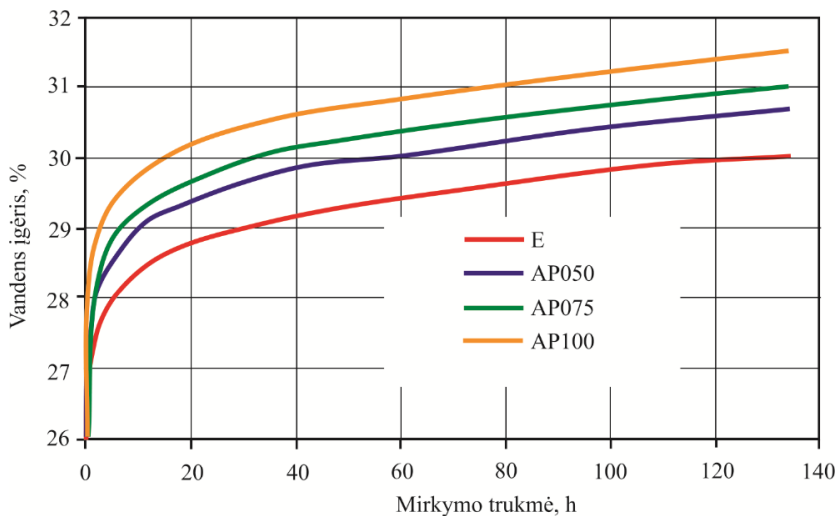
3.35 pav. Bandinių UIG po standartinio gaisro temperatūros poveikio
Fig. 3.35. Samples of UIG after the standard fire temperature exposure

Po aukštos temperatūros poveikio nustatyta, kad bandiniai su AP priedu turi mažesnę UIG negu E bandiniai. Žinoma, kad AP priedas yra atsparesnis gaisro temperatūros poveikiui, palyginti su celiuliozės pluoštų priedu. dėl aukštos temperatūros poveikio vyksta celiuliozės pluoštų priedo terminė destrukcija, kas lemia medžiagos struktūros destrukciją ir atsirandančius terminius įtrūkius. Tačiau UIG rezultatai rodo, kad bandiniuose su didesniu celiuliozės pluošto mišinio priedu po gaisro poveikio mikrostruktūra išlieka tankesnė. AP prisideda prie papildomų mikroįtrūkių atsiradimo po standartinio gaisro temperatūros poveikio. UIG įtaką turi įvairūs įtrūkiai ir plyšiai. Šios tendencijos patvirtina, kad paaiškinimo aprašytiems reiškiniams reikia ieškoti kompleksškai atliekant OM ir SEM tyrimus.

3.5.3. Ilgalaikio vandens įgėrio tyrimai po standartinio gaisro poveikio

Darbe buvo atlikti ir AP bandinių po gaisro temperatūros poveikio ilgalaikio vandens įgėrio tyrimai. Jų rezultatai pateikiami 3.36 pav.

Bandinių su AP priedu ilgalaikis vandens įgėris buvo didesnis negu E bandinių. Didžiausias ilgalaikis vandens įgėris buvo nustatytas AP100 bandiniams, jis buvo 31,5 %, AP075 bandiniams – 31,1 %, o AP050 bandiniams – 30,7 %. Palyginti su kitais, E bandinių ilgalaikis vandens įgėris buvo mažiausias – 30,1 %. AP bandinių didesnis ilgalaikis vandens įgėris gali būti dėl didesnio mikroįtrūkių kiekio ir ženklios bandinių destrukcijos.

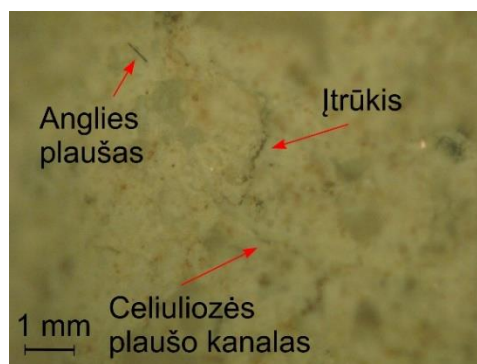


3.36 pav. Bandinių ilgalaikio vandens įgėris po standartinio gaisro temperatūros poveikio

Fig. 3.36. Samples of long-term water absorption after the standard fire temperature exposure

3.5.4. Mikro- ir makrostruktūros tyrimai

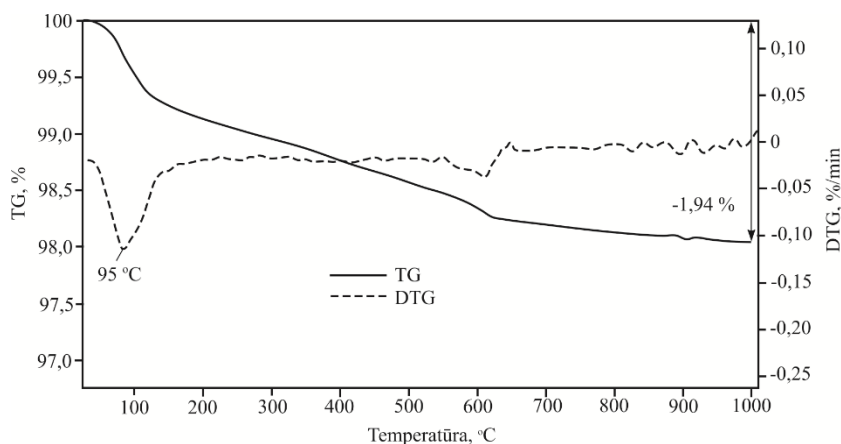
OM tyrimai sudarė sąlygas identifikuoti celiuliozės pluoštų išdegimą po standartinio gaisro temperatūros poveikio. Taip pat nustatyta, kad AP išlieka makrostruktūroje. Tyrimai atlikti didinant vaizdą 100 kartų ir pateikiami 3.37 pav.



3.37 pav. Bandinio AP050 makrostruktūra po standartinio gaisro temperatūros poveikio (100 kartų didinimas)

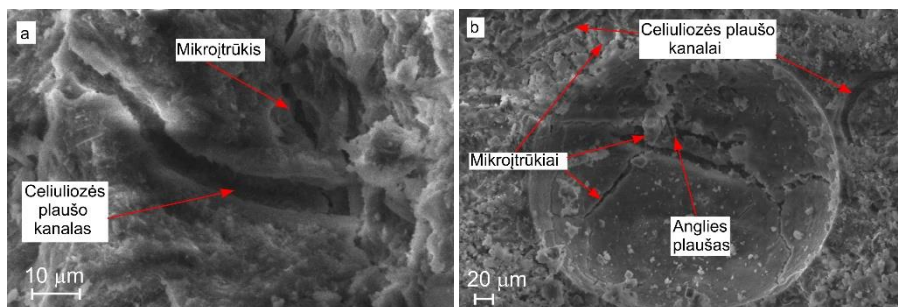
Fig. 3.37. Sample's AP050 macro-structure after the standard fire temperature exposure (zoomed-in 100 times)

Atlikti AP priedo terminės analizės tyrimai (3.38 pav.) parodė, kad terminio poveikio metu AP turi du ryškesnius masės nuostolių etapus. Pirmasis masės nuostolis fiksuojamas esant 80 °C temperatūrai ir tęsiasi iki 120 °C temperatūros. Šioje temperatūroje įvyksta AP paviršiuje esančios drėgmės pašalinimas. Tolygiai iki 600 °C temperatūros vyksta bandinio masės mažėjimas, susijęs su AP paviršiuje esančios hidrofobinės medžiagos išdegimu. Gutiérrez-Cano ir kt. (2018) nurodo, kad hidrofobinės medžiagos išdegimas vyksta iki 450 °C temperatūros. Masės nuostolio padidėjimas fiksuojamas esant 620 °C. Mokslininkų atlikti tyrimai rodo, kad, esant didesnei kaip 600 °C temperatūrai, AP praranda hidroksilo grupę (Pei ir Cheng, 2012, Gao ir kt., 2009). Esant šiai temperatūrai, taip pat nustatytas ženklus AP skerspjūvio sumažėjimas (Kim ir kt., 2022).



3.38 pav. AP terminės analizės rezultatai

Fig. 3.38. AP thermal analysis results



3.39 pav. Bandinių mikrostruktūra po standartinio gaisro temperatūros poveikio (3000 kartų didinimas): E bandinys (a), AP100 bandinys (b)

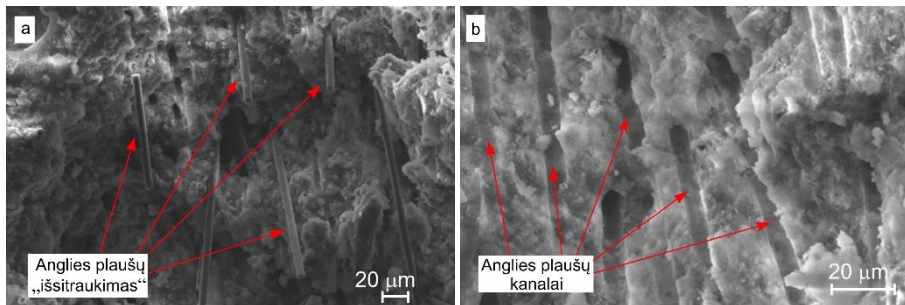
Fig. 3.39. Samples of microstructure after standard fire temperature exposure (zoomed in 3000 times): E sample (a), AP100 sample (b)

OM tyrimai leido identifikuoti terminius įtrūkius, kurie turi įtakos UIG ir bandinių mechaninėms savybėms.

Atlikti SEM mikrostruktūros tyrimai taip pat parodė celiuliozės pluoštų išdegimo pėdsakus ir mikroįtrūkių susidarymą bandiniuose. Vaizdai pateikiami 3.39 pav.

Išanalizavus bandinių mikrostruktūrą nustatyta, kad bandiniai su AP priedu turėjo daugiau mikroįtrūkių, palyginti su E bandiniais. Veikiant standartinio gaisro temperatūrai, hidratai pradeda plėstis, o mikrostruktūroje esantis vanduo virsta garais, padidindamas savo tūrį. AP priedas, bandiniuose sutankindamas mikrostruktūrą, sukuria kliūtį vandeniui pasišalinti, taip padidindamas vidinius įtempius mikrostruktūroje. Papildomi įtempiai gali susidaryti ir dėl skirtingo armavimo priedų šilumos plėtimosi koeficiento. E bandiniai be AP priedo buvo homogeniškesnės struktūros, o tai turėjo įtakos jo savybėms, veikiant standartinio gaisro temperatūros poveikiui.

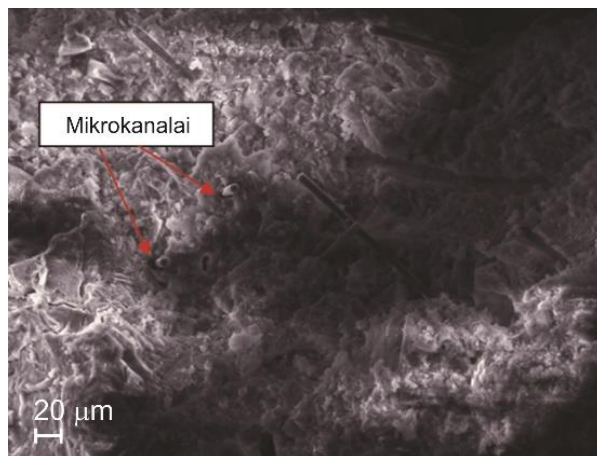
Pasitelkus SEM, buvo ištirta kontakto zona tarp AP ir cementinės matricos. Nustatyta, kad AFK bandiniuose tarp AP ir cementinės matricos nesusidaro stiprūs ryšiai ir, esant mechaniniam poveikiui, AP priedas „išsitraukia“ iš cementinės matricos (3.40 pav.).



3.40 pav. AP „išsitraukimas“ iš cementinės matricos, esant mechaniniam poveikiui po standartinio gaisro temperatūros poveikio (3000 kartų didinimas): „išsitraukimas“ (a), likę kanalai po AP „išsitraukimo“ (b)

Fig. 3.40. CF “removal” from cement matrix due to mechanical effect in samples after fire temperature effect (zoomed-in 3000 times): CF residue (a), remaining channels after CF removal (b)

AP „išsitraukimo“ efektas cementinėse medžiagose mokslininkams buvo žinomas ir aprašytas jau 1990 m. (Larson ir kt., 1990.). Boris (2016) savo disertacijoje nagrinėjo AP priedo poveikį cementinėms medžiagoms. Tyrimai, atlikti 500 °C ir aukštesėje temperatūroje, parodė, kad AP beveik suyra, vietomis liko susiformavę mikrokanaalai.



3.41 pav. AP050 bandinio mikrostruktūra po standartinio gaisro temperatūros poveikio (3000 kartų didinimas)

Fig. 3.41. AP050 sample's microstructure after standard fire temperature exposure (zoomed-in 3000 times)

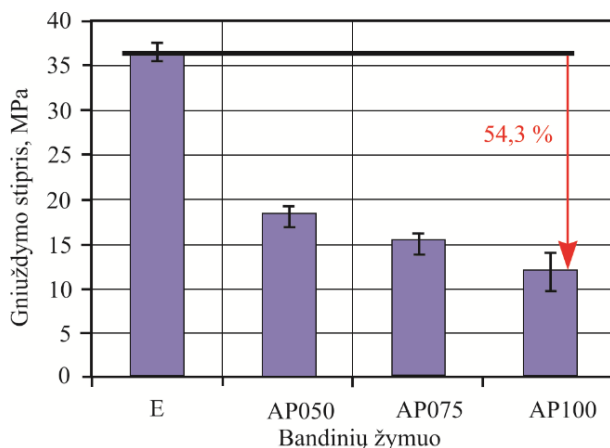
3.41 pav. pateikta AP050 bandinio mikrostruktūra po standartinio gaisro temperatūros poveikio. Matoma, kad aplink AP cementinėje matricoje yra susiformavę ~1–2 μm pločio mikrokanalai. Šių mikrokanalų suformavimą lėmė AP susitraukimas standartinio gaisro temperatūroje bei susitraukimo metu veikę įtempiai, dėl kurių dalis cementinės matricos kontakto zonoje su AP buvo pažeista.

AFK bandiniuose, veikiant standartinio gaisro temperatūrai, įvyksta sudėtingi pokyčiai: vandens pasišalinimas, papildomų vidinių įtempių susidarymas, aukštesnėje nei 600 °C temperatūroje prasideda AP paviršiaus oksidacija (Wang ir kt., 2018), įvyksta pagrindinio hidrato CSH (tobermorito) dehidratacija. Toks kompleksinis poveikis lemia, kad kontaktas tarp AP ir cementinės matricos mažėja.

3.5.5. Mechaninių savybių tyrimai po standartinio gaisro poveikio

Buvo nustatytas AFK bandinių su AP priedu gniuždymo stipris po standartinio gaisro poveikio (3.42 pav.).

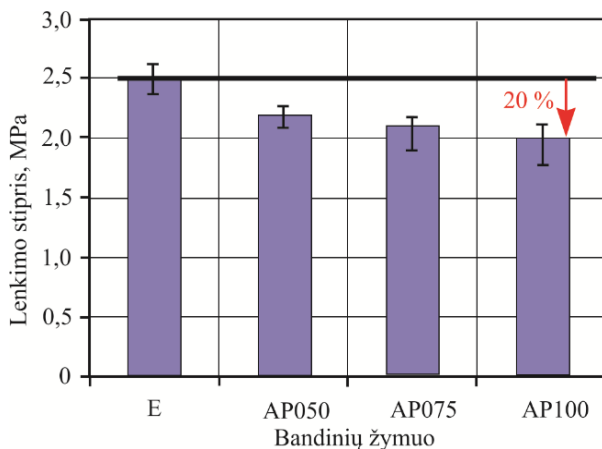
Bandinių gniuždymo rezultatai po gaisro temperatūros poveikio parodė, kad bandinių gniuždymo stipris mažėja, didėjant AP priedo kiekiui. Bendruoju atveju tai yra dėl dehidratacijos, mikro- ir makroįtrūkių, atsiradusių porų ir kitų cementinėms medžiagoms būdingų reiškinių, kurie atsiranda veikiant aukštai temperatūrai. Tačiau, lyginant E bandinių rezultatus su bandiniais, kuriuose buvo panaudotas AP priedas, matyti, kad šių bandinių vertės sumažėjo.



3.42 pav. Gniuždymo stipris po standartinio gaisro temperatūros poveikio
Fig. 3.42. Compressive strength after the standard fire temperature exposure

Didžiausias 54,3 % sumažėjimas buvo AP100 bandiniuose, kur buvo panaudotas didžiausias AP priedo kiekis. Toks rezultatas paaiškinamas AP ir cementinės matricos kontakto zonos silpnu ryšiu, kuris nėra atsparus aukštos temperatūros poveikiui. Matomos tendencijos, kad, didėjant AP priedui bandiniuose, jų gniuždymo stipris mažėja.

Po gaisro temperatūros poveikio lenkimo stiprio rezultatai sumažėjo. Ryškus jų sumažėjimas buvo bandiniuose su AP priedu (3.43 pav.).

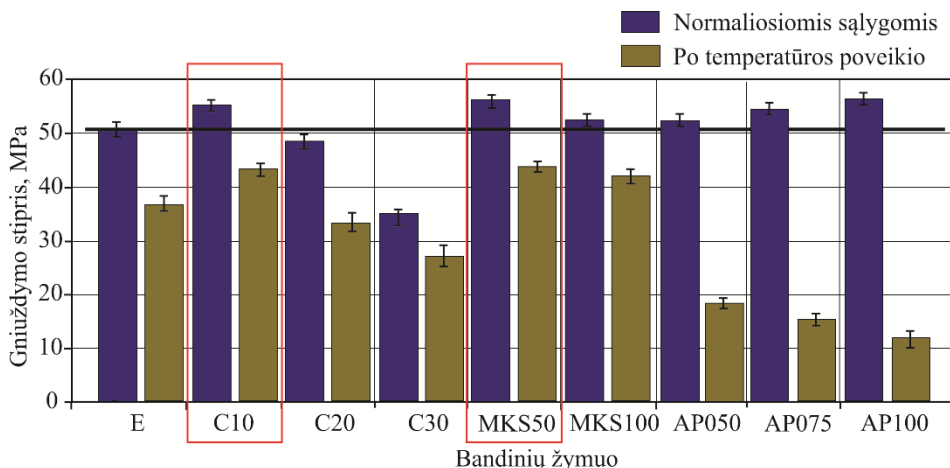


3.43 pav. Lenkimo stipris po standartinio gaisro temperatūros poveikio
Fig. 3.43. Flexural strength after the standard fire temperature exposure

SEM atliktų bandinių, veiktų aukšta temperatūra, po lenkimo bandymų rezultatai parodė, kad AP priedas „išsitraukia“ iš cementinės matricos veikiant lenkimo jėgai. Analogiškai, pagal gniuždymo rezultatus, galima teigti, kad AP priedo ir cementinės matricos kontakto stipris sumažėja veikiant aukštai gaisro temperatūrai. SEM atlikti tyrimai neparodė, kad aplink AP priedą susidarytų cemento hidratacijos centrai. Palyginus AP ir celiuliozės pluoštų priedo kontaktą su cementine matrica, matyti, kad celiuliozės pluoštų priedas turi savo paviršiuje daugiau hidratacijos produktų (3.30 pav.).

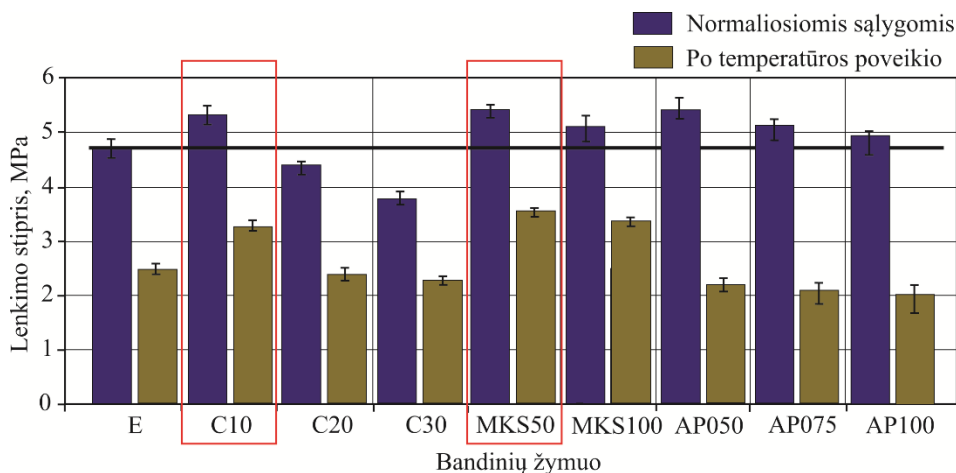
3.6. Autoklavinio fibrocemento kompozito su priedais mechaninių savybių apibendrinimas

Po savybių nustatymo buvo parinkta AFK sudėtis su optimaliu PGA priedų kiekiu ir (ar) anglies plaušo priedu. Atlikus bandinių savybių tyrimus normaliosiomis sąlygomis bei po gaisro temperatūros poveikių ir susisteminius gautus rezultatus, galima teigti, kad, atsižvelgiant į mechaninių savybių tyrimus, tinkamiausia sudėtis AFK gamybai yra pažymėta C10 ir MKS50 žymenimis. Šių sudėčių bandiniai mažiausiai praranda mechaninių savybių vertes po gaisro temperatūros poveikio, o jų rezultatai iki aukštos temperatūros poveikio yra net geresni nei kontrolinių bandinių. Susistemintas gniuždymo stiprio rezultatų vaizdas pateiktas 3.44 pav., o lenkimo stiprio – 3.45 pav.



3.44 pav. Visų bandinių gniuždymo stiprio vidurkių palyginimas normaliosiomis sąlygomis ir po standartinio gaisro temperatūros poveikio

Fig. 3.44. Comparison of average compressive mechanical of all specimens in a normal environment and after standard fire temperature exposure



3.45 pav. Visų bandinių lenkimo stiprio vidurkių palyginimas normaliosiomis sąlygomis ir po standartinio gaisro temperatūros poveikio

Fig. 3.45. Comparison of average flexural mechanical of all specimens in a normal environment and after standard fire temperature exposure

Išnagrinėjus anksčiau pateiktus bandymo rezultatus, matyti, kad bandinių C10 ir MKS50 mechaninių savybių vertės po standartinio gaisro temperatūros poveikio buvo didžiausios. Remiantis rezultatais, galima daryti prielaidą, kad tokios sudėties AFK plokštės galėtų būti atsparesnės standartinio gaisro temperatūros poveikiui.

3.7. Regresinės analizės rezultatai

Iš eksperimentinių duomenų, gautų atlikus mechaninius bandymus, atlikta statistinė analizė parodė mechaninių savybių priklausomybę nuo kintamojo (PGA ir AP). Priklausomybės stiprį išreiškia determinacijos koeficientas R^2 , kuris gali būti nuo 0 iki 1. Kuo koeficiento reikšmė didesnė, tuo geriau tinka modelis duomenims aprašyti. Blogai, jei $R^2 < 0,20$, $R^2 = 0,25$, tai rodo, kad modelis nėra tinkantis, reikėtų ieškoti kito modelio su didesne verte (Čekanavičius ir Murauskas, 2014), arba duomenys neturi priklausomybės nuo tam tikrų rodiklių. Nustatytos priklausomybės pateikiamos tiesinėmis lygtimis, o apibendrinta regresinės analizės informacija pateikiama 3.2 ir 3.3 lentelėse.

3.2 lentelė. AFK mechaninių savybių prognozavimo empirinės formulės, atsižvelgiant į naudotus priedus, įprastomis normaliosiomis sąlygomis

Table 3.2. Empirical formulas for predicting the strength properties of AFC considering the additives used before the standard fire exposure

Bandinių žymuo	Empirinė formulė	Determinacijos koeficientas R^2
C_L (PGA vietoje CEM, lenkimo stipris)	$f_{cf} = -0,036x + 5,09$	0,5538
C_G (PGA vietoje CEM, gniuždymo stipris)	$f_c = -0,545x + 55,45$	0,6453
MKS_L (PGA vietoje M300, lenkimo stipris)	$f_{cf} = 0,004x + 4,8667$	0,3243
MKS_G (PGA vietoje M300, gniuždymo stipris)	$f_c = 0,022x + 52,2$	0,152
AP_L (AP, lenkimo stipris)	$f_{cf} = 0,029x + 4,8829$	0,1931
AP_G (AP, gniuždymo stipris)	$f_c = 3,8971x + 50,383$	0,8962

3.3 lentelė. AFK mechaninių savybių prognozavimo empirinės formulės, atsižvelgiant į naudotus priedus, po standartinio gaisro poveikio

Table 3.3. Empirical formulas for predicting the strength properties of AFC considering the additives used after the standard fire exposure

Bandinių žymuo	Empirinė formulė	Determinacijos koeficientas R^2
C_L (PGA vietoje CEM, lenkimo stipris)	$f_{cf} = -0,015x + 2,85$	0,1793
C_G (PGA vietoje CEM, gniuždymo stipris)	$f_c = -0,383x + 40,87$	0,5352
MKS_L (PGA vietoje M300, lenkimo stipris)	$f_{cf} = 0,009x + 2,7167$	0,5898
MKS_G (PGA vietoje M300, gniuždymo stipris)	$f_c = -0,055x + 40,87$	0,5339

3.3 lentelės pabaiga

Bandinių žymuo	Empirinė formulė	Determinacijos koeficientas R^2
AP _L (AP, lenkimo stipris)	$f_{cf} = -0,5029x + 2,4829$	0,9878
AP _G (AP, gniuždymo stipris)	$f_c = -24,754x + 34,574$	0,9333

Lygtims sudaryti naudota imtis buvo nedidele ($n = 5$). Parinktas tiesinės priklausomybės tipas yra paprasčiausias. Tai padaryta vadovaujantis taisykle – pasirinkti kuo paprastesnį priklausomybės tipą:

- jei kiti sudėtingesni priklausomybių tipai turi labai artimas determinacijos koeficiento reikšmes;
- nesirinkti labai sudėtingų polinominės priklausomybės tipų ir vadovautis nuostata, kad šie rodikliai neturi priklausomybės vienas nuo kito, o jų reikšmės kinta ne pagal iš anksto žinomą taisyklę.

Pagal pateiktas determinacijos koeficientų reikšmes (3.2 lentelė), galima daryti išvadą, kad gniuždymo stiprio priklausomybė, esant normaliosioms sąlygoms, nuo anglies plaušo kiekio yra stipri. Šios priklausomybės koreliacijos koeficientas R yra lygus 0,9467. Gniuždymo ir lenkimo stiprio priklausomybės nuo PGA panaudotos vietoje cemento yra vidutinio stiprumo, o jų koreliacijos koeficientai yra atitinkamai 0,8033 ir 0,7441.

Pagal pateiktas determinacijos koeficientų reikšmes (3.3 lentelė), galima daryti išvadą, kad gniuždymo ir lenkimo stiprio priklausomybė nuo anglies plaušo kiekio po standartinio gaisro poveikio yra labai stipri. Šių priklausomybių koreliacijos koeficientas R yra lygus atitinkamai 0,9659 ir 0,9939. Gniuždymo ir lenkimo stiprio priklausomybės nuo PGA, panaudotos vietoje smėlio M300, yra vidutinio stiprumo, o jų koreliacijos koeficientai yra atitinkamai 0,7307 ir 0,7680, o gniuždymo stiprio priklausomybė nuo PGA, panaudotos vietoje cemento, yra taip pat vidutinio stiprumo, jos koreliacijos koeficientas R yra 0,7316.

Nustatytos empirinės lygtys gali būti naudojamos AFK su PGA ar AP priešais mechaninėms savybėms prognozuoti.

3.8. Sukurto autoklavinio fibrocemento kompozito degumo klasės nustatymas

Degumo klasės nustatymo tyrimas buvo atliktas tik C10 ir MKS50 bandiniams, dėl jų geresnių rezultatų vertinant fizikines ir mechanines savybes po standartinio gaisro poveikio. Šio eksperimentinio tyrimo bandymo rezultatai pateikiami 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. C10 ir MKS50 bandinių PSC rezultatai, MJ/kg

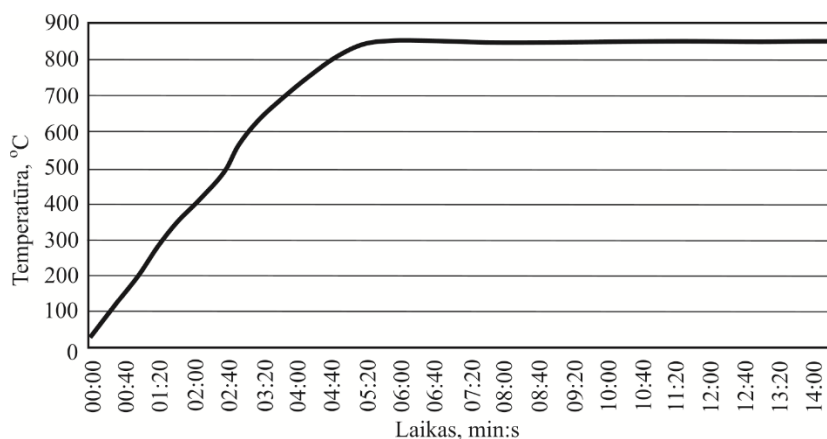
Table 3.4. C10 and MKS50 samples' PSC results, MJ/kg

Bandinys	PSC, MJ/kg		
	1 bandymas	2 bandymas	3 bandymas
C10	1,1	1,0	1,4
MKS50	1,0	1,2	1,1

Įvertinus eksperimentinių tyrimų rezultatus, vadovaujantis LST EN 13501-1 standarto nuostatomis, AFK bandiniai C10 ir MKS50 pagal nustatytą PCS galėtų būti priskiriami A1 degumo klasei, kuri nurodo, kad kompozitas yra nedegus ir nepalaikantis degimo.

3.9. Sukurto autoklavinio fibrocemento kompozito atsparumo ugniai nustatymas

Bandymų metu buvo matuojama 6-ių termoporų temperatūra, kurių vidurkio pokytis laikui bėgant pateikiamas 3.46 pav. Termoporos sumontuotos siekiant pateikti bandymo metu sukuriamą temperatūrą. Iš esmės visų bandymų temperatūros kilimo dinamika buvo labai panaši dėl standartinio degiklio ir kitų vienodų aplinkos bandymo sąlygų.



3.46 pav. Bandymo metu užfiksuotas temperatūros pokytis

Fig. 3.46. Change in temperature recorded during the test

Apibendrinti atsparumo ugniai rezultatai pateikiami 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Atsparumo ugniai rezultatai, apibūdinami kaip įtrūkis, įtrūkių tinklas, įtrūkis per plokštės storį, be poveikio

Table 3.5. Fire resistance results are described as cracks, cracks net, cracks through the thickness of the board, and no impact

Bandinys	1 bandymas	2 bandymas	3 bandymas
E	įtrūkių tinklas, įtrūkis per plokštės storį	be poveikio	įtrūkių tinklas, įtrūkis per plokštės storį
C10	be poveikio	įtrūkių tinklas	be poveikio
MKS50	įtrūkis	be poveikio	be poveikio

Nustatyta, kad tik vienas bandinys iš trijų tiriamųjų E bandinių po atsparumo ugniai bandymo buvo be regimų paviršinių struktūros įtrūkių. Kitais atvejais po vizualios apžiūros buvo nustatyti AFK E bandinių plokščių paviršiaus įtrūkiai, rodantys destruktinį terminį poveikį. Be įtrūkių tinko, bandiniuose nustatyti gilūs 2–3 mm pločio įtrūkiai per plokštės storį. AFK E bandinių paviršius pateikiamas 3.47 pav.



3.47 pav. Bandinių paviršiaus vaizdas po atsparumo ugniai bandymo (3 kartų didinimas): E1 bandinys (a), E3 bandinys (b) (2 kartų didinimas)

Fig. 3.47. Local view of sample surface after fire resistance testing (zoomed in three times): E1 sample (a), E3 sample (b) (zoomed in 2 times)

Du C10 bandiniai iš trijų tiriamųjų po 15 min atsparumo ugniai bandymo buvo be regimų paviršiaus pažeidimų. MKS50 bandiniai, taip pat du iš trijų bandinių buvo be regimų paviršiaus pažeidimų. C10 ir MKS50 bandinių paviršiaus vaizdas po atsparumo ugniai tyrimo pateikiamas 3.48 pav. MKS bandinio paviršiuje po gaisro

temperatūros poveikio susiformavo vienas ~6 cm ilgio įtrūkis netoli plokštės tvirtinimo vietos. C10 bandinio paviršiuje susidarė įtrūkių tinklas, tačiau jis buvo be giluminių įtrūkių per visą plokštės storį.



3.48 pav. Bandinių paviršiaus vaizdas po atsparumo ugniai bandymo: MKS50 1 bandinys (a), C10 2 bandinys (b) (2 kartų didinimas)

Fig. 3.48. Local view of sample surface after fire resistance testing: MKS50 1 sample (a), C10 2 sample (b) (zoomed in two times)

Palyginus įtrūkių kiekius, dydį ir stiprumą, galima teigti, kad C10 ir MKS50 bandinių sudėties AFK yra atsparesnis gaisro temperatūros poveikiui, palyginti su E bandinių sudėties AFK.

3.10. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatyta, kad veikiant aukštai temperatūriai AFK struktūroje įvyksta įvairūs procesai (vandens pašalinimas, hidratų skilimas, kvarco polimorfinis pokytis), išdega armavimui naudojamas celiuliozės pluoštas ir susidaro mikrokanalai. Visi šie veiksniai silpnina AFK struktūrą, dėl to mažėja jo mechaninės savybės. Gniuždymo stipris sumažėja 27,8 %, o lenkimo stipris – 46,8 %.
2. APK bandiniuose panaudojus GPA vietoje cemento ar vietoje malto kvarcinio smėlio (M300), pasikeičia kompozito fizikinės ir mechaninės savybės:
 - 2.1. Mikro- ir makrostruktūros tyrimai parodė, kad GPA pakaitos panaudojimas AFK sudėtyje lėmė tankios, su tolygiu porų pasiskirtymu mikrostruktūros susidarymą, hidratacijai nepanaudoto malto kvarcinio smėlio (M300) įsikomponavimą kaip užpildo į mikrostruktūrą. Didesnis nei 10 % priedo panaudojimas didina kompozito poringumą, o atitinkamai mažėjantis cemento kiekis mažina hidratų kiekį. Tyrimai po standartinio gaisro poveikio parodė, kad didesnis negu 10 % GPA

- naudojimas lėmė didesnę mikroįtrūkių susidarymą struktūroje. Šie įtrūkiai susidarė tarp porų ir porų viduje.
- 2.2. DTG ir TGA tyrimais nustatyta, kad AFK iki 1000 °C temperatūros vyksta keturi egzoterminiai efektai, esant 350 °C, 420 °C, 880 °C ir 920–930 °C temperatūroms ir du endoterminiai efektai, esant 130–150 °C ir 571 °C temperatūroms. GPA panaudojimas lėmė padidėjusią tobermorito terminio skilimo temperatūrą, o palyginamieji cheminės sudėties tyrimai patvirtino tobermorito su įterptu aliuminiu susidarymą. Taip pat nustatyta, kad, naudojant daugiau kai 10 % priedo, dalis jo nedalyvauja hidratacijoje ir lieka kaip užpildas.
- 2.3. Nustatyta, kad PGA priedo panaudojimas kompozite neturi reikšmingos įtakos bandinių orasausiam tankiui. Atlikus UIG tyrimus, nustatyta, kad modifikuotajame kompozite greitis buvo ~3850 m/s, nemoifikuotojo kompozito bandiniuose ~3300 m/s, o ilgalaikio vandens įgėrio tyrimais nustatyta ~16 % įgertis modifikuotajame ir ~18 % nemoifikuotajame kompozite. PGA panaudojimas modifikuotajame kompozite formuoja tankesnę struktūrą dėl susidarančio kompaktiškesnio kristalinio tobermorito su įkomponuotu aliuminiu. Be to, kadangi GPA pirminėje cemento hidratacijoje dalyvauja hidratų formavimo procese, tai po antrinės cemento hidratacijos nesureagavęs maltas kvarcinis smėlis dėl savo dydžio įsispraudžia tarp hidratų, taip dar papildomai sutankindamas kompozito struktūrą.
- 2.4. Kompozitų bandiniuose panaudojus GPA priedą, suformuota tanki struktūra po standartinio gaisro temperatūros poveikio degraduoja mažiau. Modifikuotojo kompozito bandiniuose nustatytas UIG ~3400 m/s, nemoifikuotojo kompozito bandiniuose ~3100 m/s, o ilgalaikis vandens įgėris buvo ~26,5 % ir ~30 % nemoifikuotajame kompozite. Bandinių orasausio tankio rezultatų skirtumai tarp modifikuotojo ir kontrolinių bandinių buvo nereikšmingi.
- 2.5. AFK sudėtyje GPA naudojimas iki 10 % didina kompozito mechanines savybes. Bandinių gniuždymo stipris padidėja ~9 %, o lenkimo stipris ~13 %, palyginti su kontroliniais bandiniais. Panaudojus kompozite GPA daugiau nei 10 %, kompozito mechaninės savybės sumažėja. Gniuždymo stipris mažėja ~25,5 %, o lenkimo stipris – ~8 %, palyginti su kontroliniais bandiniais.
- 2.6. Sukurto AFK su 10 % GPA priedu mechaninės savybės po standartinio gaisro temperatūros poveikio buvo toks: gniuždymo stipris ~43 Mpa, lenkimo stipris ~3,5 MPa.
3. AFK sudėtyje panaudojus AP iki 1 % pakeičiant dalį celiuliozės pluošto mišinį, pasikeičia kompozito fizikinės ir mechaninės savybės:

- 3.1. Mikro- ir makrostruktūros tyrimai parodė, kad AP dėl savo mažesnio dydžio įsikomponuoja į kompozito struktūrą persipindamas su celiuliozės pluoštu ir sustiprindamas armavimo poveikį. Tyrimai, atlikti po standartinio gaisro temperatūros poveikio, parodė, kad AP veikiant standartinio gaisro temperatūrai susitraukia, dėl to tarp plaušo ir cementinės matricos susidaro mikrokanalai ir prarandamas kontaktas su cementine matrica. Po mechaninių savybių tyrimų nustatyta AP „išsitraukimo“ iš cementinės matricos atvejų, kuriuos lėmė anksčiau aprašyti procesai.
- 3.2. AFK sudėtyje AP priedo panaudojimas kompozite neturi reikšmingos įtakos bandinių orasausiam tankiui, kuris pasikeičia paklaidos ribose. Atlikus UIG tyrimus nustatyta, kad modifikuotajame kompozite greitis buvo ~3350 m/s, nemodifikuotojo kompozito bandiniuose ~3300 m/s, o ilgalaikio vandens įgėrio tyrimais nustatyta ~17,5 % įgertis modifikuotajame ir ~18 % nemodifikuotajame kompozite. AP panaudojimas modifikuotajame kompozite formuoja šiek tiek tankesnę struktūrą dėl savo dydžio ir formos.
- 3.3. Kompozitų bandiniuose panaudotas AP priedas didina suformuotos struktūros degradaciją po standartinio gaisro temperatūros poveikio. Modifikuotojo kompozito bandiniuose nustatytas UIG ~3060 m/s, nemodifikuotojo kompozito bandiniuose ~3100 m/s, o ilgalaikis vandens įgėris buvo ~31 % ir ~30 % nemodifikuotajame kompozite. Struktūroje panaudotas AP priedo terminis susitraukimas lėmė mikrokanalų formavimąsi aplink savo paviršių ir kartu UIG mažėjimą bei ilgalaikio vandens įgėrio padidėjimą. Bandinių orasausio tankio rezultatų skirtumai tarp modifikuotojo ir kontrolinių bandinių buvo nereikšmingi.
- 3.4. AFK sudėtyje AP naudojimas, iki 1 % pakeičiant celiuliozės pluoštą, didina bandinių mechanines savybes. Gniuždymo stipris padidėja ~7 %, o lenkimo stipris ~15 %, palyginti su kontroliniais bandiniais. Tai siejama su AP tamprumo moduliu, kuris yra didesnis už celiuliozės pluošto tamprumo modulį.
- 3.5. Modifikuotojo AFK su AP mechaninės savybės sumažėjo po standartinio gaisro temperatūros poveikio dėl AP įvykusio terminio susitraukimo, kas lėmė kontakto tarp armavimo priedo ir cementinės matricos sumažėjimą. Standartinio gaisro temperatūros paveiktų bandinių gniuždymo stipris mažėjo 54,3 %, lenkimo stipris – 20 %.
4. AFK su GPA priedu sudėtyje nustatyta A1 degumo klasė. Atsižvelgiant į normatyvinių gaisrinę saugą reglamentuojančių teisės aktų reikalavimus,

kompozitas galėtų būti naudojamas fasado sistemoms ir komplektų sistemoms, apsaugančioms pastato laikančiąsias konstrukcijas nuo gaisro temperatūros poveikio.

5. Gaisriniai bandymai pagal autoriaus patobulintą metodiką patvirtino, kad sukurtas AFK su GPA iki 10 % yra atsparesnis standartinio gaisro temperatūros poveikiui.

Bendrosios išvados

1. Nustatyta, kad, veikiant aukštai temperatūrai, nemodifikuotojo autoklavinio fibrocemento struktūroje įvyksta įvairūs procesai (vandens pašalinimas, hidratų skilimas, kvarco polimorfinis pokytis), išdega armavimui naudojamas celiuliozės pluoštas, susidarant mikrokanalams ir įtrūkiams. Dėl to autoklavinio fibrocemento kompozito liekamasis lenkimo stipris tiesiekia ~50 %, gniuždymo stipris ~70 % ir atsparumas ugniai standartiniam gaisro poveikui yra nepakankamas.
2. Autoklavinio fibrocemento kompozito sudėtyje panaudojus atlieką, susidarančią gaminant putstiklio granules, iki 10 % keičiant cementą, arba priedo panaudojimas visiškai pakeičiant maltą kvarcinį smėlį, lemia tobermorito su įterptu aliuminiu susidarymą, tolygų porų pasiskirstymą ir tankesnės sutrūktūros formavimą. Dėl to gerėja autoklavinio fibrocemento kompozito mechaninės savybės, palyginti su nemodifikuotuoju kompozitu, ir padidėja atsparumas standartinio gaisro temperatūros poveikiui – liekamasis lenkimo stipris siekia ~65 %, o gniuždymo stipris – ~80 %.
3. Autoklavinio fibrocemento kompozito sudėtyje celiuliozės pluoštą iš dalies pakeitus anglies pluošto priedu (iki 1 %), padidėja kompozito mechaninių savybių vertės. Lenkimo stiprio vertė padidėja iki 15 % dėl didesnio anglies plaušo tamprumo stiprio, palyginti su celiuliozės

plaušų stipriu ir papildomo armavimo, kurį užtikrina skirtingo dydžio plaušų pasiskirstymas kompozito struktūroje. Tačiau anglies pluošto naudojimas autoklavinio fibrocemento kompozito sudėtyje nepagerina jo atsparumo ugniai, palyginti su nemodifikuotuoju kompozitu, dėl mikrokanalų, kurie susidarė anglies plaušo terminio susitraukimo metu, nes tai silpnina kompozito struktūrą. Šie rezultatai rodo, kad, minimizuojant pakeisto anglies plaušo kiekį, galima padidinti kompozito mechaninį atsparumą normaliomis eksploataavimo sąlygomis, nemažinant medžiagos atsparumo aukštų temperatūrų poveikiams. Ši anglies plaušo kiekio optimizavimo problema turi būti įvardyta ateities tyrimų objektu.

4. Remiantis tyrimų rezultatais, fasadų sistemose ir sistemose, apsaugančiose pastato laikančiąsias konstrukcijas nuo gaisro temperatūros poveikio, naudoti buvo sukurtas autoklavinis fibrocemento kompozitas su atliekos, susidarantios gaminant putstiklio granules, priedu. Sukurtas nedegus ir nepalaikantis degimo A1 degumo klasės kompozitas pasižymi šiomis charakteristikomis: tankis $\sim 1580 \text{ kg/m}^3$, gniuždymo stipris $\sim 56 \text{ MPa}$, lenkimo stipris $\sim 5,4 \text{ MPa}$, ilgalaikis vandens įgėris $\sim 16 \%$.

Literatūra ir šaltiniai

- Aïtcin, C. P. & Flatt, R. (2016). *Science and Technology of Concrete Admixtures*. 1st Edition. Woodhead Publishing. 666 p.
- Al-Nasrawy, D. K., Dahhan, N. A. & Judran, A.K. (2010). Study the effect of kaolin addition on some physical and mechanical properties of α -SiC powder. *Tikrit Journal of Pure Science*, 15(1), 250–254.
- Amer, A. A. & El-Hoseny, S. (2017). Properties and performance of metakaolin pozzolanic cement pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129, 33–44. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6087-9>
- Andreeva, N. A. (2011). Himija cementa i vjzhashhih veshhestv. Uchebnoe izdanie. Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. Sankt-Peterburg, 67 s.
- Antonovič, V., Witek, J., Mačiulaitis, R., Boris, R. & Stonys, R. (2017). The effect of carbon and polypropylene fibers on thermal shock resistance of the refractory castable. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(5), 672–678. <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1292949>
- Ardanuy, M., Claramunt, J. & Filho, T. D. R. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and building materials*, 79, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>
- Ariyanayagam, A. & Mahendran, M. (2013). Fire safety of buildings based on realistic fire time-temperature curves. In Manley, K, Hampson, K, & Kajewski, S (Eds.) *Proceedings of the 19th International CIB World Building Congress, Brisbane 2013: Construction and Society*. Queensland University of Technology, Australia. 1–13.

- Athavan, A., Catchmark, J. & Rajabipour, F. (2017). Ductility enhancement of autoclaved cellulose fiber reinforced cement boards manufactured using a laboratory method simulating the Hatschek process. *Construction and Building Materials*, 135, 251–259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.001>
- Badogiannis, E., Tsivilis, S., Papadakis, V. & Chaniotakis, E. (2002). The effect of metakaolin on concrete properties. In: *Proceedings of International Congress: Challenges of Concrete Construction, Dundee*, 81–89.
- Barkauskas, K., Nagrockienė, Dž., Pundienė, I. & Vaičekauskienė, V. (2022). The effect of a complex pozzolanic additive consisting of milled glass and metakaolin on the degradation of a cementitious composite with ground waste glass caused by alkali-silica reaction. *Ceramics-Silikáty. Prague: University of Chemistry and Technology*, 66(3): 325–338. <https://doi.org/10.13168/cs.2022.0028>
- Bezerra, U. T., Martinelli, A. E., Melo, D. M. A., Melo, M. A. F. & Oliveira, V. G. (2011). The strength retrogression of special class Portland oilwell cement. *Cerâmica*, 57(342), 150–154. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000200004>
- Biagioni, C., Bonaccorsi, E., Lezzerini, M. & Merlino, S. (2016). Thermal behavior of Al-rich tobermorite. *European Journal of Mineralogy*, 28(1), 23–32. <https://doi.org/10.1127/ejm/2015/0027-2499>
- Boris, R. (2016). *Vidutinio cemento kiekio ugniai atsparaus betono su klinkeriniu užpildu struktūros ir savybių tyrimai*. [Daktaro disertacija, VGTU]. Vilnius: Technika. 104 p. <https://doi.org/10.20334/2372-M>
- Bradley, A. N. (2016). Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 91(1): 262–282. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>
- Brushilinsky, N. N., Hall, J. R., Sokolov, S. V. & Wagner, P. (2018). *World fire statistics*, Publisher: Center of Fire Statistics of CTIF.
- Callister, W. D. Jr. (2007). *Materials Science and Engineering*, 7th ed.; Publisher: Department of Metallurgical Engineering The University of Utah, United States. 832 p.
- Cantor, P., Arruda, M. R. T., Firmo, J. & Branco, F. (2022). Proposal of Standard Wildfire Curves for the Design Protection of Dwellings against Wildland Fire. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 26(3), 04022021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000706](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000706)
- Čekanavius, V. & Murauskas, G. (2014). *Taikomoji regresinė analizė socialiniuose moksluose*. Vilnius: Vilniaus universitetas. 561 p.
- Chatterjee, S. & Hadi, A. S. (2012). *Regression Analysis by Example*, 5th ed.; Publisher: John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 403 p.
- Chatterjee, S. & Smirnov, J. S. (2013). *Handbook of Regression Analysis*, Publisher: John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 236 p.
- Chen, L., Wang, Z., Wang, Y. & Feng, J. (2016). Preparation and Properties of Alkali Activated. *Materials*, 9(767), 1–12. <https://doi.org/10.3390/ma9090767>

- Chen, M., Lu, L., Wang., S., Zhao, P., Zhang, W. & Zhang, S. (2017). Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing. *Construction and Building Materials*, 143, 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.143>
- Chen, T., Gao, X. & Ren, M. (2018). Effects of autoclave curing and fly ash on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 864–872. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.074>
- Claringbull, G. F. & Hey, M. H. (1952). A re-examination of tobermorite. *Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society*, 29(218), 960–962. <https://doi.org/10.1180/minmag.1952.029.218.10>
- Cooke, A. M. & Akers, S. A. S. (2008). The effect of aluminous additives on the properties of Autoclaved Cellulose Fibre Cement. In: *Proceedings of the 11th International Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference*, 2008, 4–7.
- Correia, V. C., Santos, S. F., Tonoli, G. H. D., & Savastano, H. (2020). Characterization of vegetable fibers and their application in cementitious composites. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials (Second Edition)*, 141–167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00007-X>
- DeJong, M. J. & Ulm, F. J. (2007). The nanogranular behavior of CSH at elevated temperatures (up to 700 °C). *Cement and Concrete Research* 37, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.006>
- Deltuva, J., Gailius, A., Gumuliauskas, A., Kulikauskas, L., Malakuskas, M. & Martynaitis, M. (1982). *Statybinės medžiagos*. Vilnius: Mokslas. 348 p.
- Dinakar, P., Pradosh, K. S. & Sriram G. (2013). Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(3), 215–223. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0045-0>
- Dolando, J. S., Griebel, M. & Hamaekers, J. (2007). Molecular dynamic study of cementitious calcium silicate hydrate (CSH) gels. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(2), 3938–3942. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01984.x>
- Donėlienė, J. (2018). *Funkcinių $x\text{CaO} \cdot y(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2) \cdot z\text{H}_2\text{O}$ junginių hidroterminė sintezė, jų savybės ir taikymas* [Daktaro disertacija. KTU]. Kaunas: Technologija. 113 p.
- Eisinas, A., Dambrasuskas, T., Baltakys, K. & Ruginyte, K. (2019). The peculiarities of mayenite formation from synthetic katoite and calcium monocarboaluminate samples in temperature range 25–1150 °C. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(5), 2275–2282. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08482-4>
- Espert, A., Vilaplana, F. & Karlsson, S. (2004). Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(11), 1267–1276. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.04.004>
- ETAG 034 „Guideline for European technical approval of kits for external wall claddings. Part I: Ventilated cladding kits comprising cladding components and associated fixing“. Brussel, 2012. 98 p.

Farmer, V., Jeevertnam, J., Speakman, K. & Taylor, H. F. W. (1966). Thermal decomposition of 14 Å tobermorite from Crestmore. *Symposium Structure Portland Cement Paste Concrete Special Report*, 90, 291–299.

Foley, E. M., Kim, J. J. & Reda Taha, M. M. (2012). Synthesis and nano-mechanical characterization of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) made with 1.5 CaO/SiO₂ mixture. *Cement and Concrete Research*, 42(9), 1225–1232.

Frías, M. & Cabrera, J. (2000). Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 561–569. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00203-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00203-9)

Fylak, M., Pöllmann, H. & Wenda, R. (2012). Application of cryo scanning electron microscopy for the investigation of early OPC-hydration. In *34th International Conference on Cement Microscopy*, 116, 137. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.05.014>

Gabrovšek, R., Vuk, T. & Kaučič, T. (2008). The Preparation and Thermal Behavior of Calcium Monocarboaluminate. *Acta chimica Slovenica*, 55(4), 942–950.

Gao, X., Jang, J. & Nagase, S. (2009). Hydrazine and thermal reduction of graphene oxide: reaction mechanisms, product structures, and reaction design. *Journal of Physical and Chemical*, 114(2), 832–842. <https://doi.org/10.1021/jp909284g>

Gorzelaneczyk, T. & Schabowicz, K. (2014). Nondestructive testing of moisture in cellulose fiber cement boards. 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, October 6–10.

Guillaume, E., Fateh, T., Schillinger, R., Chiva, R. & Ukleja, S. (2018). Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based cladding, using intermediate-scale test method. *Fire and Materials*, 42(5), 561–577. <https://doi.org/10.1002/fam.2635>

Guo, X. & Shi, H. (2017). Microstructure and heavy metal adsorption mechanisms of hydrothermally synthesized Al-substituted tobermorite. *Materials and Structures*, 50(245). <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1100-0>

Guo, X., Meng, F. & Shi, H. (2017). Microstructure and characterization of hydrothermal synthesis of Al-substituted tobermorite. *Construction and Building Materials*, 133, 253–260.

Gupta, M., Pasi, A., Ray, A. & Kaale, S. R. (2013). An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 768–778. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.09.020>

Gutiérrez-Cano, V., Rodríguez, F., González, J. A. & Díaz, V. (2018). Thermal degradation of hydrophobic graphite-based thin film nano-coatings observed by Raman spectroscopy. *Thin Solid Films*, 648, 8–11. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.12.023>

Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature, *Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 61(1), 145–154. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0013>

Hertz, K. D. (1982). The anchorage capacity of reinforcing bars at normal and high temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 34(121), 213–220. <https://doi.org/10.1680/mac.1982.34.121.213>

Ilić, B., Mitrović, A., Miličić, L. & Zdujić, M. (2018). Compressive strength and microstructure of ordinary cured and autoclaved cement-based composites with mechanically activated kaolins. *Construction and Building Materials*, 178, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.144>

ISO 13943:2023 „Gaisrinė sauga. Aiškinamasis žodynas“. Vilnius, 2023. 68 p.

Isu, N., Ishida, H. & Mitsuda, T. (1995). Influence of quartz particle on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (IO tobermorite formation). *Cement and Concrete Research*, 25(2), 243–248. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00003-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00003-8)

Jefimovas, A. (2015). *Statybinės medienos pirolizinis apanglėjimas* [Daktaro disertacija. VGTU]. Vilnius: Technika. 111 p. <https://doi.org/10.20334/2317-M>

Jennings, H. M. (1986). Aqueous solubility relationships for two types of calcium silicate hydrate. *Journal of the American Ceramic Society*, 69(8), 614–618. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1986.tb04818.x>

Kabayashi, K., Nakamura, H., Yamaguchi, A., Itakura, M., Machina, M. & Okumura, M. (2021). Machine learning potentials for tobermorite minerals. *Computational Materials Science*, 188, 110173. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.110173>

Kaklauskas, G., Bačinskas, D., Gribniak, V., Jakubovskis, R., Ulbinas, D., Gudonis, E., Meškėnas, A., Timinskas, E. & Sokolov, A. (2012). *Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos: vadovėlis*. Vilnius: Technika. 300 p.

Kalousek, G. L. & Adams, M. (1952). Hydration products formed in cement pastes at 25 to 175 °C. *Journal Proceedings. American concrete institute*, 48(9), 77–90. <https://doi.org/10.3989/mc.1952.v02.i031.2733>

Ke, Ch., Wang, S. & Liu, J. (2012). Effect of hydration products transformation for compressive strength of autoclaved silicate products. *Mechanics and Materials*, 204–208, 3644–3647. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3644>

Khatib, J. M., Negim, E. M. & Gjonbalaj, E. (2012). High volume metakaolin as cement replacement in mortar, *World Journal of Chemistry*, 7(1), 7–10.

Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429–447. <https://doi.org/10.1002/pse.51>

Kim, G., Lee, H., Kim, K. & Kim, D. U. (2022). Effect of Heat Treatment Atmosphere and Temperature on the Properties of Carbon Fibers. *Polymers*, 14(12), 2412. <https://doi.org/10.3390/polym14122412>

Klimesh, D. S. & Ray, A. (1997). Metakaolin addition to autoclaved cement-quartz pastes: evaluation of the acid-insoluble residue. *Advanced in Cement Research*, 9(36), 157–165. <https://doi.org/10.1680/adcr.1997.9.36.157>

Klimesh, D. S. & Ray, A. (1998). Autoclaved Cement-Quartz Pastes with Metakaolin Addition. *Advanced Cement Based Materials*, 7(3–4), 109–118. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00073-4)

Kobayashi, K., Nakamura, H., Yamaguchi, A., Itakura, M., Machida, M. & Okumura, M. (2021). Machine learning potentials for tobermorite minerals. *Computational Material Science*, 188(15), 110173. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.110173>

- Kocak, Y. (2020). Effect of metakaolin on hydration development of Portland – composite cement. *Journal of Building Engineering*, 31, 101419. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101419>
- Kontoleonos, F., Tsakiridis, P., Marinos, A., Katsiotis, N., Kaloidas, V. & Katsioti, M. (2013). Dry-grinded Ultrafine Cement Hydration. Physicochemical and Microstructural Characterization. *Materials Research*, 16(2), 404–416. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000014>
- Kosmatka, S. H., Kerhhooff, B. & Panarese, W. C. (2003). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Fourteenth edition, Portland Cement Association, 189 p.
- Koutný, O., Opravil, T. & Pořízka, J. (2014). Application of metakaoline in autoclaved aerated concrete technology. *Advanced Materials Research*, 100, 174–177. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.174>
- Kubiliūtė, R. (2014). *Pucolaninio priedo iš molio ir AlF_3 gamybos atliekos sintezė bei įtaka portlandcemenčio savybėms* [Daktaro disertacija. KTU]. Kaunas, 115 p.
- Kuzyk, A., Yakovchuk, R. & Yemelyanenko, S. (2020). FDS simulation of fire spread EPS insulated facade and comparison of model results with experimental data. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 18, 45–48.
- Larson, B. K., Drzal, L.T. & Sorousian, P. (1990). Carbon fibre-cement adhesion in carbon fiber reinforced cement composites. *Composites*, 21, 205–215. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(90\)90235-O](https://doi.org/10.1016/0010-4361(90)90235-O)
- Lekūnaitė, L. (2013). *Kalcio hidrosilikatų susidarymą intensyvinančių priedų poveikis autoklavinio akytojo betono formavimo mišinių ir produktų savybėms* [Daktaro disertacija. VGTU]. Vilnius: Technika. 100 p. <https://doi.org/10.20334/2149-M>
- Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimas. (2013). *Dėl priešgaisrinės saugos standarto užtikrinimo*. 2013, balandžio 17, Nr. 354.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2004). *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1–2 dalis. Bendrieji poveikiai. Gaisro poveikiai konstrukcijoms*. Vilnius, 2004. 53 p. (LST EN 1991-1-2:2004).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2009). *Betono užpildai*. Vilnius, 2009. 49 p. (LST EN 12620:2003+A1:2008).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2010). *Statybinių gaminių reakcijos į ugnį bandymai. Kondicionavimo prcedūros ir bendrosios pagrindų atrankos taisyklės*. Vilnius, 2010. 11 p. (LST EN 13238:2010).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2012). *Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai*. Vilnius, 2012. 35 p. (LST EN 197-1:2011).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2013). *Cementas. Bandymo metodai. 2 dalis. Cheminė analizė*. Vilnius, 2013. 73 p. (LST EN 196-2:2013).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2016). *Fasadų reakcijos į ugnį bandymai. 1 dalis. Vidutinio masto bandymas (tapatus ISO 13785-1:2002)*. Vilnius, 2016. 10 p. (LST ISO 13785-1:2016).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2019). *Gaminių reakcijos į ugnį bandymai. Viršutinės degimo šilumos (šilumingumo) nustatymas*. Vilnius, 2019. 33 p. (LST EN ISO 1760:2018).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2019). *Statybiniai termoizoliaciniai gaminiai. Ilgalaikio vandens įmirkio nustatymas panardinant (ISO 16535:2019)*. Vilnius, 2019. 13 p. (LST EN ISO 16535:2019).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2019). *Statybos gaminių ir pastato elementų klasifikavimas pagal atspumą ugniai. 1 dalis. Klasifikavimas pagal atsako į ugnį bandymo duomenis*. Vilnius, 2019, 55 p. (LST EN 13501-1:2018).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2020). *Atsparumo ugniai bandymai. 1 dalis. Bendrieji reikalavimai*. Vilnius, 2020. 54 p. (LST EN 1363-1:2020).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2021). *Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis*. Vilnius, 2021. 93 p. (LST ISO 206:2013+A2:2021).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2022). *Mūro skiedinio bandymo metodai. 10 dalis. Sukietėjusio sauso skiedinio tūrinio tanko nustatymas*. Vilnius, 2022. 8 p. (LST EN 1015-10:2022).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2022). *Statybinių gaminių reakcijos į ugnį bandymai. Statybiniai gaminiai, išskyrus grindų dangas, kuriuos veikia vieno degančio objekto šiluma*. Vilnius, 2022. 101 p. (LST EN 13823:2020+A1:2022).

Liping, G., Wenxiao, Z., Wei, S., Bo, C. & Yafan, L. (2016). High-Temperature Performance and Multiscale Damage Mechanisms of Hollow Cellulose Fiber-Reinforced Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2503780, 14. <https://doi.org/10.1155/2016/2503780>

Liu, D., Chen, M., Li, X., He, F. & Hu, J. (2018). The effect of the carbon fiber on concrete compressive strength. *Advanced materials Research*, 1145, 106–111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1145.106>

Lublóy, E., Kopeckó, K., Balázs, G. L. & Restás, Á. (2017). Improved fire resistance by using Portland-pozzolana or Portland-fly ash cement. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(2), 925–936. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6245-0>

Maeshima, T., Noma, H., Sakiyama, M. & Mitsuda, T. (2003). Natural 1.1 and 1.4 nm tobermorites from Fuka, Okayama, Japan: Chemical analysis, cell dimensions, ²⁹Si nmR and thermal behavior. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1515–1523. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00099-1)

Majdinasab, A. & Yuan, Q. (2020). Synthesis of Al-substituted 11 Å tobermorite using waste glass cullet: A study on the microstructure. *Materials Chemistry and Physics*, 250, 123069. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123069>

Marvila, M. T., Rocha, H. A., Azevedo, A. R. G., Colorado, H. A., Zapata, J. F. & Vieira, C. M. F. (2021). Use of natural vegetable fibers in cementitious composites: Concepts and applications. *Innovative Infrastructure Solution*, 6, 180. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00551-8>

Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education. 675 p.

- Merlino, S., Bonaccorsi E. & Armbruster, T. (2000). The real structures of clinotobermorite and tobermorite 9 Å: OD character, polytypes, and structural relationships. *European journal of Mineralogy*, 12(2), 411–429. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2000/0012-0411>
- Merlino, S., Bonaccorsi E. & Armbruster, T. (2001). The real structure of tobermorite 11 Å: Normal and anomalous forms, OD character and polytypic modifications. *European journal of Mineralogy*, 13(3), 577–590. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2001/0013-0577>
- Mirdehghan, S. A. (2021). Fibrous polymeric composites. In *The Textile Institute Book Series, Engineered Polymeric Fibrous Materials*. Woodhead Publishing. 1–58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824381-7.00012-3>
- Oh, J. E., Clark, S. M., Wenk, H. R. & Monteiro, P. J. M. (2012). Experimental determination of bulk modulus of 14 Å tobermorite using high pressure synchrotron X-ray diffraction. *Cement and Concrete Research*, 42(2), 397–403. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.004>
- Ornaghi, H. L., Monticeli, F. M., Neves, R. M., Agnol, L. D. & Bianchi, O. (2021). Influence of different cellulose/hemicellulose/lignin ratios on the thermal degradation behavior: prediction and optimization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 7775–7782. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01651-2>
- Pan, Y., Huang, W., Jiang, Y. & Song, Q. (2016). Effect of aluminium insertion materials on the properties of ACC. *Engineering Materials*, 703, 406–410. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.703.406>
- Passaglia, E. & Rinaldi, R. (1982). Katoite, a new member of the $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3\text{-Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$ series and a new nomenclature for the hydrogrossular group of minerals. *Bulletin de Minéralogie*, 105(7), 605–618. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1984.7804>
- Pehlivanli, Z. O., Uzun, I., Yucel, Z. P. & Demir, I. (2016). The effect of different fiber reinforcement on the thermal and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 325–330. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.223>
- Pei, S. & Cheng, H. M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9), 3210–3228. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010>
- Pei, X.Q., Bennewitz, R. & Schlarb, A. K. (2015). Mechanisms of Friction and Wear Reduction by Carbon Fiber Reinforcement of PEEK. *Tribology Letters*, 58(3), 42. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0520-7>
- Pellenq, J. M. R., Kushima, A., Shahsavari, R. & Ulm, F. J. (2009). A realistic molecular model of cement hydrates. *The Proceedings of the National Academy of sciences*, 106(38), 16102–16107. <https://doi.org/10.1073/pnas.0902180106>
- Peng, G. F., Chan, S. Y. N. & Anson, M. (2001). Chemical kinetics of C-S-H decomposition in hardened cement paste subjected to elevated temperatures up to 800°C. *Advances in Cement Research*, 13(2), 47–52. <https://doi.org/10.1680/adcr.2001.13.2.47>
- Peng, G. F., Niu, X. J., Shang, Y. J., Zhang, D. P., Chen, X. W. & Ding, H. (2018). Combined curing as a novel approach to improve resistance of ultra-high performance concrete

- to explosive spalling under high temperature and its mechanical properties. *Cement and Concrete research*, 109, 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.011>
- Pereira, A. H. A., Miyaji, D. Y., Cabrelon, M. D., Medeiros, J. & Rodrigues, J. A. (2014). A study about the contribution of the α - β phase transition of quartz to thermal cycle damage of a refractory used in fluidized catalytic cracking units. *Cerâmica*, 60(355), 449–456. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000300019>
- Phan, L. T. & Carino, J. N. (1998). Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(1), 58–64. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:1(58))
- Poletto, M., Ornaghi, H. L. J. & Zattera, A. J. (2015). Thermal Decomposition of Natural Fibers: Kinetics and Degradation Mechanisms. *Reaction and Mechanism in Thermal Analysis Materials*, 515–546. <https://doi.org/10.1002/9781119117711.ch21>
- Poon, C. S., Azhar, S., Anson, M. & Wong, Y. L. (2003). Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 83–89. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00061-0)
- Pourchez, J., Valdivieso, F., Grosseau, R., Guyonnet, R. & Guilhot, B. (2006). Kinetic modelling of the thermal decomposition of ettringite into metaettringite. *Cement and Concrete Research*, 36(11), 2054–2060. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.007>
- Powers, T. (1962). *Physical properties of cement paste*. In 4th ISCC 2, 577–613.
- Ptáček, P., Šoukal, F., Opravil, T., Havlica, J. & Brandštetr, J. (2011). The kinetic analysis of the thermal decomposition of kaolinite by DTG technique. *Powder Technology*, 208, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.11.035>
- Qing, L., Sun, H., Zhang, Y., Mu, R. & Bi, M. (2023). Research progress on aligned fiber reinforced cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 363(11), 129578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129578>
- Ranachowski, Z., Ranachowski, P., Dębowski, T., Gorzelańczyk, T. & Schabowicz, K. (2019). Investigation of Structural Degradation of Fiber Cement Boards Due Thermal Impact. *Materials*, 12(6), 944. <https://doi.org/10.3390/ma12060944>
- Rashad, A. M. (2013). Alkali-activated metakaolin : A short guide for civil Engineer – An overview. *Construction and Building Materials*, 41, 751–765. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.030>
- Richardson, I. G., Brough, A. R., Brydson, R., Groves, G. W. & Dobson, Ch. M. (1993). Location of Aluminum in Substituted Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) Gels as Determined by ²⁹Si and ²⁷Al nmR and EELS. *Journal of the American Ceramic Society*, 76(9), 2285–2288. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb07765.x>
- Rogovin Z. A. (1972). Himija celjulozy, „Himija“, Moskva, 519 s.
- Rukavina, M. J., Carevic, M. & Pecur, I. B. (2017). Fire protection of facades. The *Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts*. Zagreb, Croatia: University of Zagreb. 64 p.
- Sabir, B. B., Wild, S. & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 23, 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)

- Satava, V. & Veprek, O. (1975). Thermal Decomposition of Ettringite Under Hydrothermal Conditions. *Journal of the American Ceramic Society*, 58(7–8), 357–359. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1975.tb11513.x>
- Schachinger, I., Hilbig, H. & Stengel, T. (2008). Effect of curing temperature at an early age on the long-term strength development of UHPC. *2 International Symposium on UHPC*, Kassel (Germany), 205–212.
- Scheirs, J., Camino, G. & Tumiatti, W. (2001). Overview of water evolution during the thermal degradation of cellulose. *European Polymer Journal*, 37(5), 933–942. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(00\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(00)00211-1)
- Schober, G. (2011). Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties. *In Proceeding of the 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete*, Bydgoszcz, Poland, 14-17 September, 39–43.
- Schober, G. (2011). Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties. *5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete*, 39–43.
- Schreiner, J., Goetz-Neunhoffer, F., Neubauer, J., Volkmann, S., Bergold, S., Webler, R. & Jansen, D. (2019). Advanced Rietveld refinement and SEM analysis of tobermorite in chemically diverse autoclaved aerated concrete. *Powder Diffraction*, 34(2), 1–8. <https://doi.org/10.1017/S0885715619000149>
- Schreiner, J., Jansen, D., Ectors, D., Goetz-Neunhoffer, F., Neubauer, J. & Volkmann, S. (2018). New analytical possibilities for monitoring the phase development during the production of autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, 107, 247–252. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.028>
- Sedar, M., Gabrijel, I., Schlicke, D., Staquet, S. & Azenha, M. (2020). *Advanced Techniques for Testing of Cement-Based Materials*. Springer Tracts in Civil Engineering. 239 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39738-8>
- Šeputytė-Jucikė, J. (2016). *Priedų ir lengvųjų užpildų poveikis termoizoliacinio cemento kompozito struktūrai ir savybėms* [Daktaro disertacija. VGTU]. Vilnius: Technika. 129 p. <https://doi.org/10.20334/2366-M>
- Šerelis, E. (2016). *Ypač stipraus betono struktūros savybių ir technologijos tyrimai* [Daktaro disertacija. KTU]. Kaunas. 132 p.
- Šiaučiušas, R. & Baltakys, K. (2011). *Kalcio hidrosilikatai (elektroninis išteklius): Filosilikatų grupės junginių sintezė, savybės ir naudojimas: mokslo monografija*. Kaunas: Technologija. 241 p. <https://doi.org/10.5755/e01.9789955259411>
- Stonys, R., Pundienė, I., Antonovič, V., Kligys, M. & Spudulis, E. (2013). Study of the effect of replacing microsilica in heat-resistant concrete with additive based on metakaolin. *Refractories and Industrial Ceramics*, 54(3), 232–237. <https://doi.org/10.1007/s11148-013-9580-0>
- Saad, M., Abo-El-Enein, S. A., Hanna, G. B. & Kotkata, M. F. (1996). Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 26, 669–675. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85002-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85002-2)

- Tan, W., Zhu, G., Liu, Y., Zhang, Z. & Liu, L. (2015). Effects and mechanism research of the crystalline state for the semi- crystalline calcium silicate. *Cement and Concrete Research*, 72, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.020>
- Taylor, H. F. W. (1953). Crestmoreite and riversideite. *Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society*, 30(222), 155–165. <https://doi.org/10.1180/min-mag.1953.030.222.01>
- Taylor, H. F. W. (1992). Tobermorite, jennite, and cement gel. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 202(1–2), 41–50. <https://doi.org/10.1524/zkri.1992.202.1-2.41>
- Taylor, H. F. W. (1997). Cement Chemistry. *Thomas Telford Services Ltd.* London, 450 p. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>
- Tennis, P. D. & Jennings, H. M. (2000). A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland Cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30(6), 855–863. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00257-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00257-X)
- Thomas, J. J.; Jennings, H. M. & Allen, A. J. (2010). Relationships between compositions and density of tobermorite, jennite, and nanoscale $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(17), 7594–7601. <https://doi.org/10.1021/jp910733x>
- Tikkanen, J., Cwirzen, A. & Penttala, V. (2014). Effects of mineral powders on hydration porcess and hydration products in normal strength concrete. *Construction and Building Materials*, 72(15), 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.066>
- Vaněk, V., Nespěšný, O., Vystřčil, J., Bečkovský, D., Vajkay, F. & Pěňčík, J. (2024). Experimental determination of fracture mechanical properties of cement -fibre boards reinforced with cellulose and PVA fibers for FE analysis. *Construction and Building Materials*, 411(12), 134622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134622>
- Viehland, D., Yuan, L. J., Xu, Z., Cong, X. D. & Kirkpatrick, R. J. (2005). Structural studies of jennite and 1.4 nm tobermorite: disordered layering along the [100] of jennite. *Journal of the American Ceramic Society*, 80(12), 3021–3028. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1997.tb03228.x>
- Wang, J., Weng, B., Larson, P. & Liu, Y. (2018). Synthesis of ZnO nanoarrays on carbon fibers using combined atomic layer deposition and hydrothermal methods. *Material Research Express*, 5, 065029. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aac845>
- Wei, J. & Meyer, C. (2015). Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. *Cement and Concrete Research*, 73, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.019>
- Wei, J., Encurturk, B., Jain, A. & Hanifehzadeh, M. (2019). Mitigating alkali-silica reaction induced concrete degradation through cement substitution by metakaolin and bentonite. *Applied Clay Science*, 182, 105257. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105257>
- Weng, T. L., Lin, W.T. & Cheng, A. (2013). Effect of metakaolin on strength and efflorescence quantity of cement-based composites. *The Scientific Word Journal*, 20213, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2013/606524>
- White, N., & Delichatsios, M. (2014). *Fire Hazards of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components*. Quincy, Massachusetts, USA: The Fire Protection Research Foundation. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2898-9>

- Woodhams, R. T., Thomas, G. & Rodgers, D. K. (1984). Wood fibers as reinforcing fillers for polyolefins. *Polymer Engineering and Science*, 24(15), 1166–1171. <https://doi.org/10.1002/pen.760241504>
- Yang, X., Cui, Ch., Cui, X., Tang, G. & Ma, H. (2014). High-temperature phase transition and the activity of tobermorite. *Cementitious Materials*, 29, 298–301. <https://doi.org/10.1007/s11595-014-0911-x>
- Yu, P. & Kirkpatrick, R. (1999). Thermal dehydration of tobermorite and jennite. *Concrete Science and Engineering*, 1, 185–191.
- Zegardło, B. (2022). Heat-resistance concretes containing waste carbon fibers from the sailing industry and recycled ceramic aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01084. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01084>
- Zhou, Q. & Glasser, F. P. (2001). Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120°C. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1333–1339. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00558-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00558-0)
- Zhu, J., Kee, S. H., Han, D. & Tsai, Y.T. (2011). Effects of air voids on ultrasonic wave propagation in early age cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 41(8), 872–881. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.005>
- Zickler, G. A., Wagermaier, W., Funari, S. S., Burghammer, M. & Paris, O. (2007). In situ X – ray diffraction investigation of thermal decomposition of wood cellulose. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 80(1), 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.01.011>
- Žvironaitė, J., Grinys, A., Ivanauskas, E. & Kligys, M. (2016). The sulfate resistance of various cementitious binders according to different performance indicators at Nordic countries conditions. *Construction and Building Materials*, 125, 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.061>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Veliseicik, T., Zurauskiene, R. & Valentukeviciene, M. (2020). Determining the impact of high temperature fire conditions on fibre cement boards using thermogravimetric analysis. *Symmetry*, 12(10), 1717. <https://doi.org/10.3390/sym12101717>

Veliseicik, T., Zurauskiene, R., Kligys, M. & Dauksevic, M. (2022). Influence of industrial metakaolin waste on autoclaved fiber cement properties changes in standard fire environment. *Materials*, 15(10), 3455. <https://doi.org/10.3390/ma15103455>

Veliseicik, T., Zurauskiene, R., Kligys, M. & Dauksevic, M. (2023). Influence of short carbon fibers on the properties of autoclaved fiber cement in standard fire environment. *Materials*, 16(6), 2513. <https://doi.org/10.3390/ma16062513>

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Autoclaved fibre cement materials are widely used in facade installation and interior decoration. Scientific research shows that these materials already break down during the first fire-growing phase. Therefore, the danger of fire spreading to thermal insulation layers increases, and fire extinguishing becomes more difficult. Expanded glass granule production waste can be used to form a structure in cementitious materials, which is more resistant to standard fire temperatures. However, the effect of this additive on the hydration process of autoclaved fibre cement composite, its physical and mechanical properties, and the behaviour of such a structure at high temperatures (in fire conditions) is not clear. Cellulose fibre is used as a reinforcing component in autoclaved fibre cement materials. Already at the initial stage of fire spread, this reinforcement material pyrolyses and affects the rapid disintegration of the material. Carbon fibre is widely used to improve cementitious composite material properties and to ensure their stability in high temperatures. However, the effect of carbon fibre on the hydration and structure formation of autoclaved fibre cement composite and its behaviour at high temperatures is unclear.

Relevance of the dissertation

Fibre cement boards are usually used in ventilated facade systems, which can also have flammable materials (wind isolating film, timber mounting girder, etc.). They are also used for interior cladding.

Global statistics show that 37% of all fires start in buildings. The fire that has spread indoors can be dangerous to load-bearing constructions. The inability to ensure the safety of fire-level load-bearing timber constructions increases the danger of supporting capacity loss during fire spread. Also, due to certain fire spread-determining circumstances, it is not uncommon for fires to spread through a building's outer wall. These fires, especially in tall and very tall buildings, can be problematic to put out for firefighting forces.

Currently, facade fire experiments are standardised and use the EN 13823 series standard with low fire size (30.7 ± 2 kW). Some European Union countries have additionally analysed real past fire consequences and evaluated realistic fire-spreading danger in their country-regulated facade system fire experiments, which use bigger fire sizes (up to 5.5 MW). Considering the above, some firefighting communities in Europe initialised the creation and harmonisation of a new facade system fire testing methodology. Predicting a new harmonised facade testing standard coming into effect in the European Union, all facade systems have to be investigated using new bigger fire size conditions during a certain time. The responsible institutions in the Republic of Lithuania are pursuing greater sustainability in construction, predicting the encouragement to use timber and organic materials from renewable natural resources in public community buildings (resolution of the Government of the Republic of Lithuania). In the fire approach, these organic materials and timber are often attributed to flammable materials that rather easily catch on fire and prevent fire spread. The fire and rescue department corrected normative, fire safety-regulated legal acts which determined conditions for using timber to install load-bearing structures in buildings up to nine floors.

To install load-bearing constructions in multi-storey buildings using timber, they will need protection from fire exposure. Autoclaved fibre cement boards can be used as protective shields seeking to protect load-bearing timber constructions. Due to this, in cases of autoclaved fibre cement products, it is important to choose solutions that determine the formation of a structure more resistant to the effect of fire temperature.

Research object

Autoclaved fibre cement composite with expanded glass granules producing waste or carbon fibre additives.

Aim of the dissertation

The dissertation aims to increase the mechanical resistance of the autoclaved fibre cement composite using the expanded glass granules producing waste or carbon fibre additives and to evaluate the effects of standard fire temperature on its mechanical properties.

Objectives of the dissertation

The following tasks had to be solved to reach the aim:

1. To determine the effect of standard fire temperature on the macro- and micro-structure, as well as the physical and mechanical properties of unmodified autoclaved fibre cement composite.
2. To research the structure formation and physical and mechanical properties of the autoclaved fibre cement composite with the addition of expanded glass granule production waste.
3. To research the structure formation, as well as the physical and mechanical properties of autoclaved fibre cement composite with carbon fibre additive.
4. To determine the composition and properties of the autoclaved fibre cement composite with expanded glass granules producing waste or carbon fibre additives, ensuring resistance to the standard fire temperature exposure.

Research methodology

X-ray, scanning electron and optical microscopy, thermogravimetric analysis, and ultrasound analysis methods were used for the research of the autoclaved fibre cement composite and its components.

The main physical and mechanical properties of the autoclaved fibre cement composite, i.e., compressive and bending mechanical, ultrasound analysis, density, and water absorption, were determined using standard methods.

The fire temperature effect was researched using a volumetric heating method that uses a standard fire temperature curve.

The fire characteristics of the autoclaved fibre cement composite were determined according to the LST EN ISO 1716 standard and according to the requirements of the LST EN ISO 13785-1 standard improved by the author.

Scientific novelty of the dissertation

1. The additives used in the scope of research have different effects on the matrix structure, hydration and mechanical properties of the autoclaved fibre cement composite, which are determined after thermal exposure under standard fire conditions. This knowledge complements the information about expanded glass granule production waste and carbon fibre additives on the properties of autoclaved cementitious materials and their change after exposure to high temperatures.
2. The use of expanded glass granules producing waste in the composition of the autoclaved fibre cement composite results in the formation of more high-temperature resistant tobermorite with inserted aluminium, distribution of pores and denser microstructure formation, the complex effect of which increases the compressive strength of the composite by about 20%, bending strength about 45%, and makes the composite more resistant to standard fire temperature effects.
3. The use of expanded glass granule production waste in the autoclaved fibre cement composite allows up to 10% replacement of cement or complete replacement of ground quartz sand without reducing the mechanical properties of the

composite. The use of the additive in the composite acts as a nucleator of tobermorite and forms the same hydrate as cement during hydration, which leads to an increase in the mechanical properties of the structure.

4. The addition of used carbon fibre (up to 1%) when changing the cellulose fibre in the autoclaved fibre cement composite integrates into the microstructure, strengthens the existing cellulose fibre reinforcement network and improves the compressive strength of the produced composite by about 7% and the bending strength by about 15%.

Practical value of the research findings

After using the additive of the expanded glass granules producing waste in the autoclaved fibre cement composite, a composite of a new composition is created, which is more resistant to the standard fire temperature and could be used in facade systems and systems protecting the building's load-bearing structures from the fire temperature exposure.

In the production of fibre cement boards using expanded glass granules producing waste, it is possible to reduce the use of ground quartz sand and cement without reducing the mechanical properties of the product. Partial replacement of cement could contribute to the reduction of CO₂ emissions.

Defended statements

In the autoclaved fibre cement composite, partial replacement of cement or complete replacement of ground quartz sand, expanded glass granule production waste, as an additive, leads to the formation of more high-temperature resistant tobermorite, with inserted aluminium, the uniform cross-section of pores, and the formation of a denser microstructure, which improves the development autoclaved fibre cement composite mechanical properties and resistance to standard fire temperature exposure.

Approval of the research findings

Three scientific articles in the dissertation topic were printed in reviewed scientific journals that have a citation rate in the *Clarivate Analytics Web of Science* database (Veliseicik et al., 2020; Veliseicik et al., 2022; Veliseicik et al., 2023).

Research results were publicised at three scientific conferences in Lithuania and abroad:

- International conference VIPSKILLS “Technological Innovation in Civil Engineering”, 2019, Vilnius, Lithuania.
- International conference “3rd International Fire Safety of Façade”, 2019, Paris, France.
- 21st Lithuanian Young Scientist Conference “Science – Lithuania’s Future”, 2021, Vilnius, Lithuania.

Dissertation structure

The dissertation comprises an introduction, three chapters and a general conclusion, a list of literature sources, a list of the author's scientific publications on the subject of the dissertation, and a summary in English.

The size of the work is 135 pages. The text uses 14 numbered formulas, 77 figures, and 20 tables. The dissertation uses 154 references.

1. Fibre cement products and their behaviour in high-temperature

Fibre cement is widely used in construction due to its great technical properties. Fibre cement boards are used for interior wall decoration, balcony and terrace enclosure installation, chimney covering, roof supports, etc. (Gorzelańczyk & Schabowicz, 2014). However, the main use of fibre cement boards is for ventilated facade system installation in the construction of new buildings and during renovation. Flammable materials are also used for facade installation, and in certain cases, flammable thermal insulating materials are used (ETAG 034). Such flammable materials in high amounts can increase the spread of fire to the outside. Also, fibre cement products can be used as materials to increase construction resistance to fire (boards, plaster or other forms). In all cases, fibre cement products can be affected by the fire temperature effect and their integral properties. It can be noted that the first fire extinguishing action is possible 15 minutes after the fire starts. After evaluating natural fire temperature curves and standard fire temperature curves, it can be seen that during the 15th minute, the temperature is higher than 650 °C, while in some cases, it can be higher than 1000 °C. Such temperature during a fire determines building construction material thermal destruction, while the latter influences building stability and immutability, as well as present people in it and working firefighter safety.

Researchers are in constant search of solutions to increase cementitious material resistance to high temperatures. These solutions are usually related to the use of additives, modifying and strengthening the material structure and resistance to high temperatures of reinforcing materials, other additives or their combination usage (Antonovič et al., 2017). Experiments were also done by choosing various cementitious material hardening regimes (Peng et al., 2018). One of the investigation methods is the use of pozzolanic additives. These experiments were made by various scientists around the world (Lublóy et al., 2017; Chen et al., 2016; Rashad, 2013; Kocak, 2020; Badogiannis et al., 2002; Sabir et al., 2001; Stonys et al., 2013; Poon et al., 2003; Ilić et al., 2018; Klimesh et al., 1997). Another method to increase the cementitious material strength property is the selection of reinforcing materials and their combinations. Such research with cellulose or carbon fibre use was conducted by Qing et al. (2023), Liu et al. (2018), Lekūnaitė (2013), Pehlivanli et al. (2016), and Guo et al. (2021).

Since the investigated scientific literature did not provide information about the resistance to the high-temperature increase of produced autoclaved fibre cement composition samples, this dissertation investigated the effect of expanded glass granule production waste (EGW) and carbon fibre (CF) additive on autoclaved fibre cement composite's (AFC) macro- and microstructure formation, as well as the influence on AFC mechanical properties before and after the fire temperature effect.

2. Raw materials, research methodology, and autoclaved fibre cement composite mixture compositions

In this dissertation, the composition of autoclaved fibre cement composite is close to the composition of production facade fibre cement boards discussed in the research. The research was carried out by replacing a part of Portland cement (PC) or milled quartz sand (M300) with EGW. Seeking for better composite mechanical properties after the fire temperature effect, a part of the reinforcing cellulose fibre mixture was replaced with CF additive. The mixture component amounts in various sample series are shown in Table S2.1. For experiments, 12 quantities of each series of samples were formed. Samples were made in prism shape forms (160×40×40) mm. Primary hardening was for 8 h, at 20±2 °C and 50±5%. Secondary hydrothermal hardening was for 10.5 h up to 179 °C and 10.13 atm.

Table S2.1. Number of raw materials in different mixtures in percentages

Samples	Quartz sand, M32	Quartz sand, M300	Cement	Cellulose fibre	Al(OH) ₃	Kaolin	EGW	CF
E	41.05	10.0	38.04	7.09	2.06	1.76	—	—
C10	41.05	10.0	34.24	7.09	2.06	1.76	3.8	—
C20	41.05	10.0	30.44	7.09	2.06	1.76	7.6	—
C30	41.05	10.0	26.64	7.09	2.06	1.76	11.4	—
MKS50	41.05	5.0	38.04	7.09	2.06	1.76	5.0	—
MKS100	41.05	—	38.04	7.09	2.06	1.76	10.0	—
AP050	41.05	10.0	38.04	6.59	2.06	1.76	—	0.5
AP075	41.05	10.0	38.04	6.34	2.06	1.76	—	0.75
AP100	41.05	10.0	38.04	6.09	2.06	1.76	—	1.0

Samples from all forming mass compositions for the determination of physical, mechanical properties, and structural characteristics were made under the same conditions until the standard fire effect and after the standard fire temperature effect. Samples and components were analysed using standard material science testing methods. AFC reaction to fire experiments were made using the requirements of the LST EN ISO 1716 standard. AFC board fire resistance experiments were carried out according to the author's modified methodology based on the standard procedure of the LST ISO 13785-1 series. "Microsoft Office Excel" software was used for experimental data collection and statistical analysis. Mathematical and statistical data were processed to determine EGW and CF additive effects and dependencies on AFC.

Standard fire temperature conditions can be created using a 5.6 kW power electric heating device. The standard fire temperature effect was investigated with half samples, i.e., six each from every series. The heating device had the standard fire temperature curve. After a 30-minute experiment reaching 841 °C temperature, the electric heating equipment was turned off, the Rockwool plate was removed, while samples were removed and left to cool off under regular laboratory conditions.

3.1. Autoclaved fibre cement composite with expanded glass granules producing waste additives research

It is known that in AF composition, there is a cellulose fibre mixture, which is not resistant to the effect of high temperature and can influence the AF structure's integrity. AF X-ray analysis after the high-temperature effect showed hydrate dehydration and cellulose burnout from the structure. AF samples were investigated using macro- and micro-structure experiments. Macro-structure research after standard fire temperature effect showed pore formation and cellulose fibre burnout. Part of the cellulose fibres remained charred, possibly due to the conditionally short standard fire temperature effect. AF microstructure research showed a more detailed view after the standard fire temperature effect (see Figure S3.1). Micro-cracks can also be seen when investigating the effect of high temperature on microstructure and hydrate dehydration.

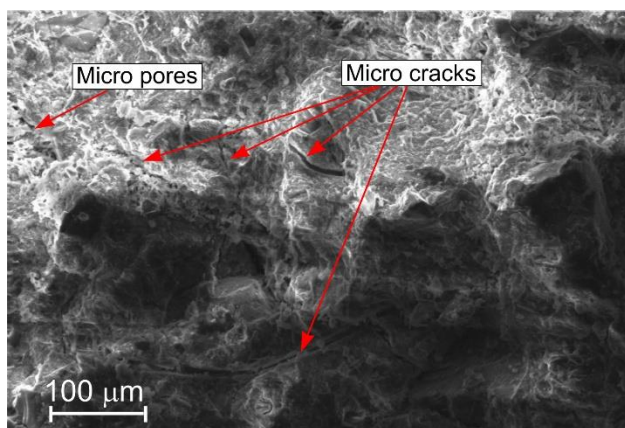


Fig. S3.1. AF microstructure after standard fire temperature effect

The experimental research showed that EGW, in all cases, lowers the AFC sample's density. Sample density fluctuated between 1500 and 1600 kg/m³.

Completed ultrasound pulse velocity research showed that samples C10 and C20 determined ultrasound pulse velocity was higher than that of E samples, while in C30 samples, it was even lower by 13%. The determined MKS50 sample's ultrasound pulse velocity was the highest from all investigated samples, i.e., about 9% higher than the E sample's speed. MKS100 sample ultrasound pulse velocity was slightly lower than that of MKS50 and C10; however, it was still higher than the spreading speed in E samples.

This research also determined the AFC sample's water absorption kinetics. Research results showed that C30 samples had the highest long-term water absorption, which after 134 h reached about 21%. The lowest water absorption was in MKS50 samples, which was equal to about 15%. Water absorption of all samples except for C30 was lower compared to that of E series samples. A conclusion was reached that EGW increases AFC long-term water absorption.

Besides macropore formation, micropores appear in samples with EGW as well as shown by the microstructure sample research (Figure S3.2), while their amount is higher than that of E samples.

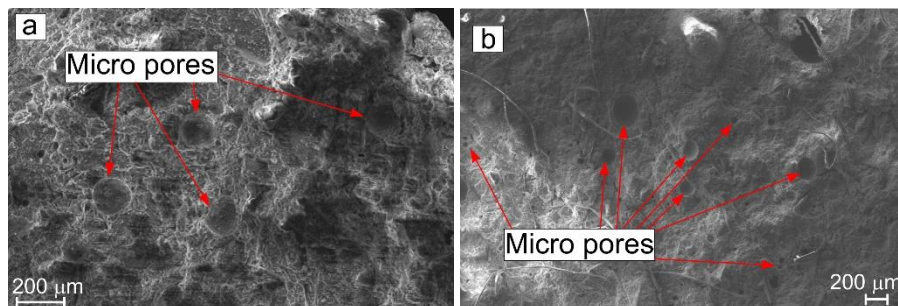


Fig. S3.2. View of sample microstructure: E sample (a), C30 sample (b)

In theoretical research, it was determined that aluminium ions in the tobermorite crystal lattice present in the EGW additive replace Si ions by forming dreierketten bonds and strengthening the microstructure. After carrying out a comparison formed tobermorite chemical property research in AFC samples it was determined that EGW increases aluminium amount in this hydrate.

It was determined that samples with EGW had a higher aluminium amount. Tobermorite comparison data is shown in Table S3.1.

Table S3.1. Tobermorite elemental chemical composition results, %

Sample	Elemental chemical composition, %							
	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
E	10.9	52.6	1.7	10.4	0.4	0.0	23.6	0.4
C10	10.1	51.1	5.8	9.8	0.7	1.1	20.6	0.8

In this work, thermal analysis research was carried out seeking to evaluate AFC macro- and microstructure formation, formed hydrates and dehydration kinetics more precisely. DTG (Figure S3.3) and TGA sample research was carried out. After carrying out multiple experiments with the same samples, the obtained research result was analogous. Overall mass losses in 1000 °C temperature fluctuate from about 14% to about 11%. A few exothermic effects were determined that happen near the temperatures of 350 °C, 420 °C, 880 °C and 920–930 °C and two endothermic effects that happen at temperatures of 130–150 °C and 571 °C.

EGW effect on AFC mechanical properties was evaluated. Results of compressive strength experiments showed that samples C10, MKS50 and MKS100 had a higher compressive strength than E sample strength. The highest compressive strength was determined in MKS50 samples, which was about 11% higher than that of E sample strength.

Similar results were obtained in C10 and MKS100 samples. Compressive strength determined in these samples was respectively about 9% and about 4% higher than E sample strength. C20 sample compressive strength was lower by about 5%. A notable sample compressive strength decrease was determined in C30 samples, which reached about 31%.

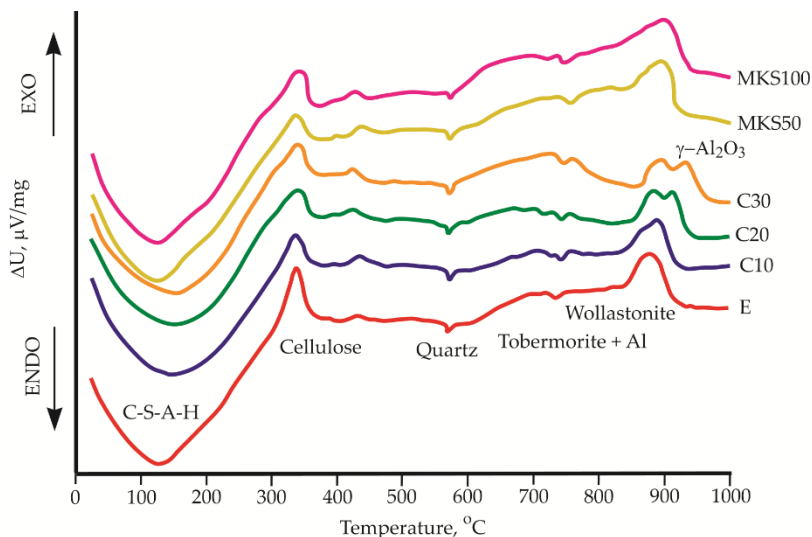


Fig. S3.3. AFC sample's DTG

Bending strength experiment results, the same as compressive strength experiment results, showed that the bending strength of the C10, MKS50 and MKS100 samples was higher than that of the E sample. The highest bending strength was determined in MKS50 samples, which was about 15% higher than that of the E sample. The bending strength of C10 and MKS100 samples was, respectively, about 13% and about 9% higher. The bending strength of the C20 sample was lower by about 6%. The highest bending strength lowering was determined in C30 samples; they reached about 19%.

Results of the compressive strength experiment showed that the EGW additive increases AFC's compressive strength. It is related to dense microstructure formation when a complex effect is achieved by aluminium-substituted tobermorite and CSH, as well as their formation peculiarities. It is also influenced by the use of milled and non-milled quartz sand forming the framework. EGW additive instead of cement or milled quartz sand increased compressive strength from about 4% to about 11% compared with E samples. The highest effect was achieved when the EGW additive composed about 4% and about 5% of overall fibre cement material mass. Samples C20 and C30 had the worse compressive strength results, most likely determined by lower cement amount in fibre cement material. It should be brought to attention that C20 samples had comparatively higher EGW amounts when compared to cement amounts and theoretically should have not formed a strong structure. However, compressive strength experiments showed that

this sample strength is only lower than E sample strength results by about 5%. For comparison, the C30 strength result percentage expression was worse by more than six times. Assumedly, milled quartz sand filled micro pores and created a sturdy microstructure with other hydrates.

When comparing bending strength results with compressive strength results, the same tendencies can be seen. Therefore, a conclusion was reached that the results of bending strength can be explained in the same way as compressive strength results.

Samples investigated under standard fire temperature environments were created according to the conditions described.

In density experiments, after the standard fire temperature effect, tendencies differed from density tendencies. In the usual case, it was determined that EGW lowers sample density; however, after the high-temperature effect, it was determined that most samples with EGW had a higher density than E samples.

After standard fire temperature exposure, all samples with EGW additive, except for C30 samples, had higher ultrasound pulse velocity results than those of E samples. The highest results were about 3480 m/s ultrasound pulse velocity. They were determined in MKS50 samples, and they were about 12% higher than in E samples. The lowest ultrasound pulse velocity was found in C30 samples, which was about 11% lower than that of E samples.

Macrostructure research with an optical microscope showed macrostructure temperature defects, visually seen in pore changes in the samples. Previous experiments showed that EGW increased pore amount in samples. The macrostructure view is shown in Figure S3.4.

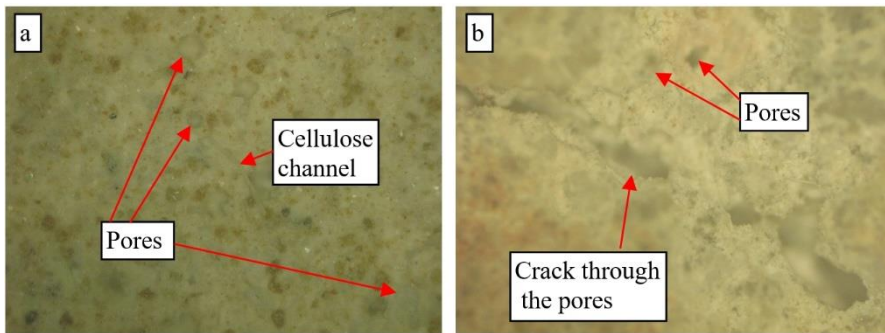


Fig. S3.4. Sample macrostructure after the effect of standard fire temperature (zoomed-in 100 times): E sample (a), C30 sample (b)

SEM experiments were carried out to evaluate the EGW effect on AFC microstructure. Besides the main hydrate, tobermorite, wollastonite was often detected after the fire temperature effect.

Strength property results after the effect of standard fire can be explained by evaluating sample micro and macro-structure formation, their main composed fibre cement components and hydrate behaviour in high temperatures. Evaluating compressive strength, C10, MKS50, and MKS100 samples in regular conditions showed better results

for this characteristic. C20 samples after the effect of standard fire had higher compressive strength loss percentage-wise, i.e., of about 31%. Since in these sample structure formations, milled quartz sand filled in micropores in high temperatures, after polymorphic quartz change, dense microstructure could have weakened, weakening the strength of the entire material. Bending strength sample result change tendencies did not differ from compressive strength results. The highest bending strength was determined in MKS50 samples, which was 3.6 MPa, i.e., 44% higher than that in E samples. Other samples, MKS100 and C10, also had better results, which were 3.4 MPa and 3.3 MPa, respectively. Samples that had a higher amount of EGW, C20 and C30, had lower bending strength, 2.4 MPa and 2.3 MPa, respectively.

3.2. Research of autoclaved fibre cement composite with carbon fibre additives

Cellulose fibre is a natural polymer which is not resistant to the effects of high temperatures. AFC density research showed the maximum difference between samples of about 4 kg/m³, which can be attributed to the margin of error.

Increasing the CF additive amount in the sample increases ultrasound pulse velocity insignificantly. The highest increase was determined in the AP100 sample case. Ultrasound pulse velocity was determined to be about 3360 m/s when compared to about 3290 m/s speed in E samples, which is about a 2% increment. In the cases of other samples, the percentage of ultrasound pulse velocity increased and was even lower than that of E samples.

Results of a long-term water absorption research showed that samples with CF additive had lower water absorption when compared with E samples. The difference between investigated samples was not high, and it reached about 4%. These results can be explained by natural cellulose fibre water absorption properties, which in most cases are better than those of synthetic fibres (Espert et al., 2004), while the low changed additive amount showed insignificant changes.

It was determined that CF incorporates itself into the AFC sample structure between cellulose fibre and strengthens the existing cellulose fibre reinforcement network. That is confirmed by SEM-carried experiments, in which compact reinforcement fibre incorporation into the microstructure can be seen (Figure S3.5).

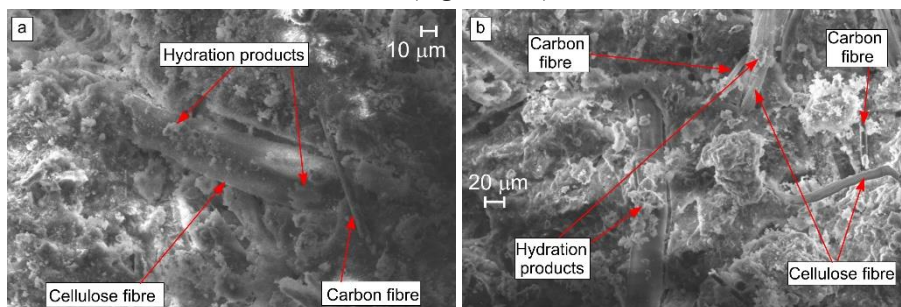


Fig. S3.5. Sample's microstructure: AP050 sample (a), AP100 sample (b)

Microstructure AP050, AP075 and AP100 sample research after mechanical effect showed that some CF “break” (Figure S3.6). Such CF behaviour confirms that, in some places, a strong bond forms between CF and the cement matrix.

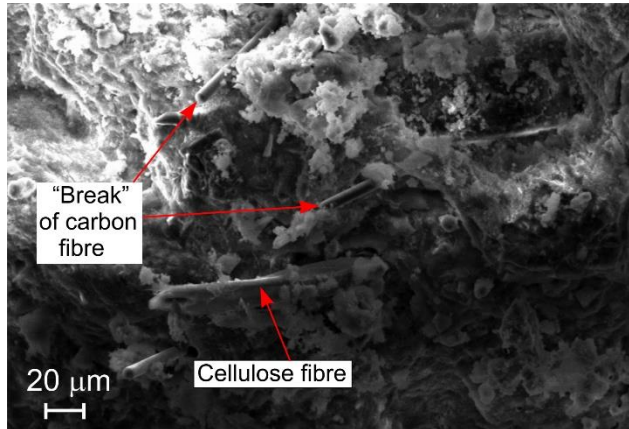


Fig. S3.6. AP100 sample microstructure

AP050, AP075 and AP100 sample compressive strength were higher than that of E samples. The highest compressive strength was determined for AP100 samples at about 54 MPa, which was about 7% higher than that of E samples. Samples with CF additive had a compressive strength of about 51 MPa to about 55 MPa. Results of the bending strength also showed that CF use in AFC improves these characteristic indicators. In this case, the highest bending strength was determined in AP050 samples, which was 5.4 MPa. In AP075 samples, the bending strength was 5.1 MPa, while in AP100 – 5 MPa. E sample's bending strength was 4.7 MPa, which is about 15% lower than that of AP050 samples. Results of compressive strength determination showed that the CF additive, under environmental temperature, rises compressive strength slightly. The most noticeable compressive strength increase was determined in AP100 samples, and it was about 7% higher than that in E samples. Compressive strength has a high influence on dense microstructure formation. Tobermorite is formed during AFC composite hardening, CASH, and other hydration products, and cellulose fibre mixture and CF are incorporated into the microstructure and reinforce the existing reinforcement network. Essentially, it is one of the main reasons why the compressive strength results did not increase significantly.

Carbon fibre additive (up to 1%) in the composition of the autoclaved fibre cement composite increases the strength properties of the composite, especially in bending, by up to 15%, due to the higher elastic modulus of the carbon fibre compared to the cellulose fibre.

After the standard effect of fire temperature, the density of samples AP050, AP075, and AP100 was investigated. The results of the sample density were similar to those of the same sample experiment results under regular conditions. It was determined that all

AFC sample densities lowered after using the CF additive. The lower density in all samples was determined by the dehydration process and cellulose burnout in samples. The difference between sample density results was about 8 kg/m^3 , which is so small that it can be within the margin of error.

Ultrasound pulse velocity experiments showed more noticeable differences between the control sample and samples with CF additives. E sample ultrasound pulse velocity was determined to be about 3100 m/s. Samples with CF additive ultrasound pulse velocity were between about 3070 m/s.

The sample with CF additive long-term water absorption was higher than that of E samples. The highest long-term water absorption was determined in AP100 samples, which was about 32%; in AP075 samples, which was about 31.5%; and in AP050 samples, which was about 31%. When comparing E samples, long-term water absorption was the lowest at about 30%. The highest long-term water absorption of CF samples can be explained by a higher amount of micro-cracks.

Carried out SEM microstructure research also showed cellulose fibre burnout trace and micro-crack formation in samples (Figure S3.7).

The contact zone between CF and the cement matrix was investigated using SEM. It was determined that in AFC samples, no strong bonds form between CF and cement matrix, and when a mechanical effect is present, the CF additive “removes” itself from the cement matrix (Figure S3.8).

AFC sample with CF additive compressive strength was determined after the standard fire effect. The sample’s compressive strength results after the effect of fire temperature showed that the sample’s compressive strength lowers as the CF additive effect rises. The highest decrease of about 54% was determined in AP100 samples, which had the highest CF additive amount. This result can be explained by the CF thermal decomposition, which led to a decrease in thickness and microchannels between the cement matrix and the CF surface. Tendencies can be seen in that as the CF additive is increased in samples, their compressive strength decreases.

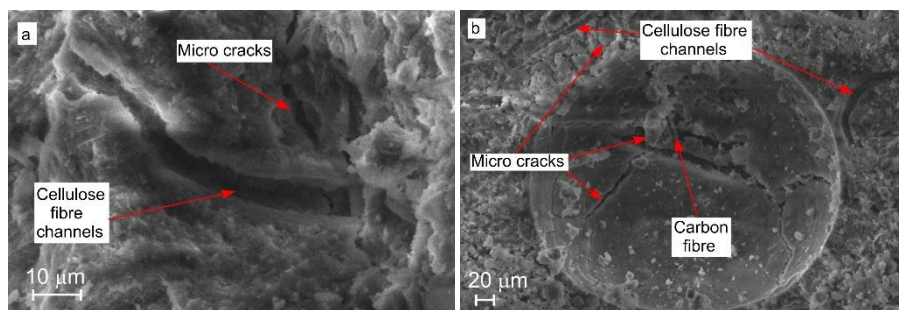


Fig. S3.7. Sample microstructure: E sample (a), AP100 sample (b)

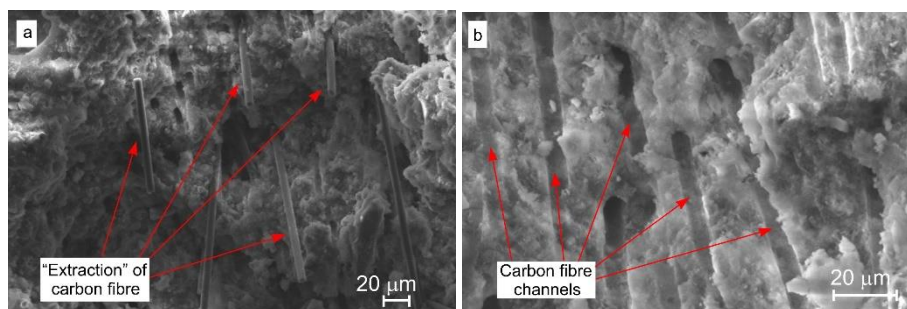


Fig. S3.8. CF “removal” from cement matrix due to mechanical effect in samples after the effect of fire temperature: CF residue (a), remaining channels after CF removal (b)

After the effect of fire temperature, the bending strength decreased. A noticeable decrease was found in samples with the CF additive. SEM carried out on samples that were affected by high temperature after bending sample results showed that CF additive “removes” itself from cement matrix when affected by bending force. Analogously for compression strength results, it can be claimed that CF additive and cement matrix contact strength is lower when affected by high fire temperature.

The systemised result of compressive mechanical properties is shown in Figure S3.9, and the bending strength is shown in Figure S3.10.

After evaluating experimental fire research results and using LST EN 13501-1 series standard as a guide, AFC samples C10 and MKS50 according to the determined PCS can be assigned to A1 reaction to fire class, which means that the composite is non-combustible and makes no contribution to fire.

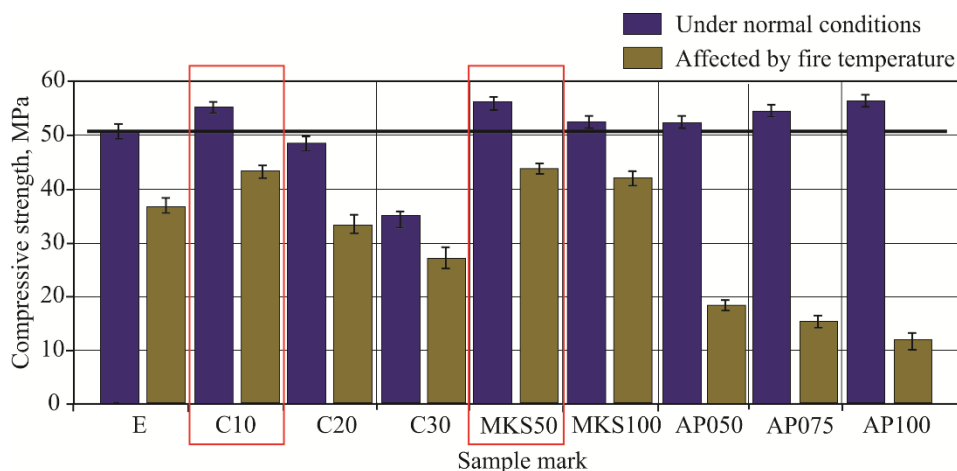


Fig. S3.9. Systematised compressive strength results before and after the effect of standard fire temperature

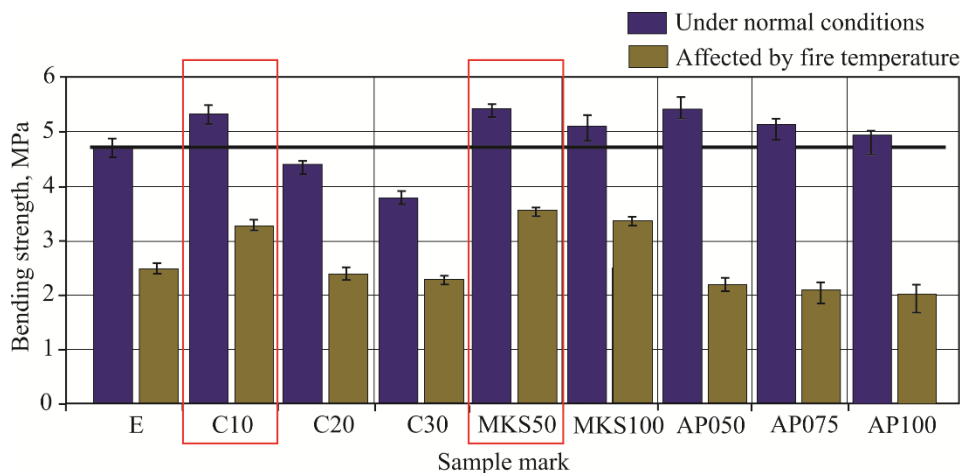


Fig. S3.10. Systematised bending strength results before and after the effect of standard fire temperature

Resistance to fire research according to the methodology created by the author showed that the AFK composition of C10 and MKS50 samples is more resistant to the effect of fire temperature compared to the AFK composition of E samples.

General conclusions

1. Various processes occur in the structure of unmodified autoclaved fibre cement exposed to high temperatures (water removal, hydrate decomposition, and polymorphic change of quartz), and the cellulose fibre used for reinforcement burn-out due to the formation of microchannels and cracks. As a result, the residual flexural strength of the autoclaved fibre cement composite is about 50%, the compressive strength is about 70%, and the fire resistance is insufficient for the standard fire effect.
2. Using the expanded glass granules producing waste in the composition of the autoclaved fibre cement composite, using up to 10% replacement of cement or the use of an additive in full replacement of ground quartz sand leads to the formation of tobermorite with inserted aluminium, even distribution of pores and the formation of a denser structure. As a result, the mechanical properties of the autoclaved fibre cement composite improve compared to the unmodified composite and increase the resistance to the effects of standard fire temperatures, i.e., the residual bending strength reaches about 65%, and the compressive strength reaches about 80%.
3. Replacing the cellulose fibre with a carbon fibre additive (up to 1%) in the composition of the autoclaved fibre cement composite increases the mechanical properties of the composite, especially flexural, by up to 15% due to the higher

elastic module of the carbon fibre compared to the cellulose fibre and the additional reinforcement provided by the distribution of different fibre sizes in the composite structure. However, the use of carbon fibre in the composition of the autoclaved fibre cement composite does not significantly improve its fire resistance compared to the unmodified composite due to the microchannels formed during the thermal contraction of the carbon fibre, which weakens the structure of the composite. These results show that by minimising the amount of replaced carbon fibre, it is possible to increase the mechanical resistance of the composite under normal operating conditions without reducing the material's resistance to the effects of high temperatures. This issue of carbon fibre content optimisation must be identified as an object of future research.

4. Based on research results, an autoclaved fibre cement composite with the addition of expanded glass granules producing waste was developed for use in façade systems and systems protecting the building's load-bearing structures from the effects of fire temperatures. The created composite is non-combustible, attributed to A1 reaction to fire class, and has the following characteristics: density of about 1580 kg/m³, compressive strength of about 56 MPa, bending strength of about 5.4 MPa, and long-term water absorption of about 16%.

Tomaš VELISEIČIK

AUTOKLAVINIO FIBROCEMENTO KOMPOZITO KŪRIMAS IR
JO SAVYBIŲ TYRIMAI STANDARTINIO GAISRO APLINKOJE

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Medžiagų inžinerija (T 008)

DEVELOPMENT OF AUTOCLAVED FIBRE CEMENT COMPOSITE
AND INVESTIGATION OF ITS PROPERTIES UNDER
STANDARD FIRE CONDITIONS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (T 008)

Lietuvių kalbos redaktorė Laimutė Kertenienė
Anglų kalbos redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2024 05 10. 12,7 sp. I. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2024-034-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius
Spausdino UAB „Ciklonas“,
Žirmūnų g. 68, LT-09124 Vilnius