VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Marija VAIČIENĖ

AKTYVIŲJŲ PRIEDŲ POVEIKIS KERAMZITBETONIO
STRUKTŪRAI IR SAVYBĖMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2006–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Romualdas MAČIULAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Konsultantas

doc. dr. Ramunė ŽURAUSKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 1942-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-026-1

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2011

© Marija, Vaičienė, 2011

marija.vaiciene@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Marija VAIČIENĖ

**INFLUENCE OF THE ACTIVE ADDITIVES
ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES
OF EXPANDED-CLAY LIGHTWEIGHT
CONCRETE**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2006–2011.

Scientific Supervisor

Prof Habil Dr Romualdas MAČIULAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Consultant

Assoc Prof Dr Ramunė ŽURAUSKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Reziumė

Disertacijoje aprašytuose tyrimuose buvo pasirinkti du aktyvūs mineraliniai priedai: nemaltas katalizatorius iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus (KAT) ir nedegta mulitinė vata (MV). Galimybės šias atliekas naudoti keramzitbetonio gamyboje iki šiol netirtos. Pagrindinė tyrimo tematika – aktyviųjų mineralinių priedų (KAT ir MV) įtaka pagrindinėms keramzitbetonio charakteristikoms.

Disertacijoje sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: ištirti aktyviųjų mineralinių priedų poveikį cemento hidratacijos mechanizmui, apskaičiuoti prognozuojamą eksploatacinį atsparumą šalčiui bei, remiantis tyrimų rezultatais, parinkti geriausius KAT ir MV atliekos kiekius keramzitbetonio mišiniuose.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir disertacijos autorės publikacijų sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Skyriaus pabaigoje pateikiamos išvados ir formuluojami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašyti tyrimų metodai ir įranga, bandinių paruošimo technologijos, keramzitbetonio mišinių sudėtys, naudotų žaliavų charakteristikos.

Trečiajame ir ketvirtajame skyriuose pateikti rezultatai apie aktyviųjų mineralinių priedų poveikį pagrindinėms keramzitbetonio savybėms, mikrostruktūrai, mišinių cemento hidratacijai ir apskaičiuotas keramzitbetonio prognozuojamas eksploatacinis atsparumas šalčiui. Darbo pabaigoje suformuluotos bendrosios išvados.

Disertacijos tema paskelbti du straipsniai, kurie įtraukti į Thomson ISI sąrašą, du – Inspec duomenų bazėje cituojamame žurnale, vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos straipsnių rinkinyje, vienas – kitame leidinyje. Disertacijos tema perskaityti šeši pranešimai Lietuvos ir užsienio konferencijose. Remiantis tyrimų rezultatais pateikta paraiška sukurtam keramzitbetoniui patentuoti.

Abstract

Two active mineral additives were selected in the investigation described in the dissertation: unground catalyst from the reactor of catalytic oil cracking (CAT) and unburned mullite wool (MW). The possibilities to utilise these raw materials in the production of the expanded-clay lightweight concrete are not analysed yet. Main topic of the research: influence of the active mineral additives (CAT and MW) on the main characteristics of the expanded-clay lightweight concrete.

The following main problems are analysed in the dissertation: analysis of the influence of the active mineral additives on the technology of cement hydration, calculation of the predicted exploitative frost resistance, as well as the selection of the best amounts of CAT and MW waste materials in the mixtures of expanded-clay lightweight concrete.

Dissertation is composed from the introduction, four sections, general conclusions, lists of the reference literature and author's publications on the topics analysed in the dissertation.

In preface, the analysed problem, research topicality is discussed, research object is described, research aim and the tasks are formulated, research methodology, scientific novelty, practical value of the research results, defended propositions are described. Introduction is finalised with author's publications and conference presentations on dissertation topic as well as structure of the dissertation.

First section is dedicated to the summary of the reference literature. At the end of the section the conclusions are formulated and dissertation tasks are revised. Second section deals with the research methodologies and equipment, preparation of the samples, compositions of expanded-clay lightweight concrete, characteristics of the raw materials utilised. In third and fourth section the results of the influence of the active mineral additives on the main properties of the expanded-clay lightweight concrete, microstructure, hydration of mixtures' cement are provided, as well as the predicted exploitative frost resistance of the expanded-clay lightweight concrete is calculated. At the end of research project the general conclusions are formulated.

2 papers have been published about the dissertation's topic. These papers are included in Thomson ISI list: two ones are included in a journal quoted in Inspec database, one – in the reviewed article lists of international conferences, one – in other publications. 6 presentations about the dissertation topic have been made in the conferences in Lithuania and abroad. Based on research results filled application form for patent of developed expanded-clay lightweight concrete.

Žymėjimai

Simboliai

CS – alitas

D – dolomitas

E – etringitas

Q – kvarcas

K – kalcitas

k – rodiklis, kuriuo įvertinamas II tipo įmaišų aktyvumas (LST EN 206-1:2002)

L – lauko špatai

m – vandens poreikis, išreikštas procentais

P – portlanditas

R – koreliacijos koeficientas (Sakalauskas 2003)

R^2 – determinacijos koeficientas (Čekanavičius, Murauskas 2002)

$m_{apšk.}$ – apskaičiuota tiriamųjų keramzitbetonio bandinių masė

s_e – vidutinis standartinis nuokrypis (Sakalauskas 2003)

Santrumpos

KAT – nemalta katalizatoriaus atlieka iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus

MV – nedegta mulitinė vata

SEM – skenuojantis elektroninis mikroskopas

V/C – vandens ir cemento santykis

Terminai

Lengvasis betonas – betonas, kurio tankis po išdžiovinimo ne mažesnis kaip 800 kg/m^3 ir ne didesnis kaip 2000 kg/m^3 . Jis gaminamas naudojant lengvuosius užpildus (visus arba jų dalį) (LST EN 206-1:2002).

Priedas (įmaiša) – medžiaga, kuri pridedama į ruošiamą betono mišinį ir kurios mažas kiekis cemento masėje modifikuoja betono mišinio arba betono savybes (LST EN 12620:2003+A1:2008).

Užpildas – betonui naudojami mineraliniai grūdėliai. Užpildai gali būti gamtiniai, dirbtiniai arba kartotiniai paruošti iš anksčiau statyboje naudotų medžiagų (LST EN 12620:2003+A1:2008).

Mikroužpildas – užpildas, kurio didžioji dalis išbyra per $0,063 \text{ mm}$ akelių sieta ir kuris gali būti dedamas į statybines medžiagas, siekiant suteikti joms tam tikrų savybių (LST EN 12620:2003+A1:2008).

Vandens ir cemento santykis – veiksnus vandens ir cemento masių santykis betono mišinyje (LST EN 206-1:2002).

Veiksnaus vandens kiekis – skirtumas tarp bendrojo ir užpilduose įsigėrusio vandens kiekių paruoštame betono mišinyje (LST EN 206-1:2002).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	5
1. PRIEDŲ POVEIKIS KERAMZITBETONIO SAVYBĖMS	7
1.1. Keramzitbetonio gamybos raida	7
1.2. Keramzitbetonio sudėtinių dalių ir sandaros įtaka savybėms	10
1.3. Mineralinių priedų rūšys ir jų įtaka	14
1.3.1. Aktyviųjų mineralinių priedų poveikis lengvojo betono savybėms	15
1.3.2. Mineralinių priedų iš atliekų naudojimas	19
1.3.3. Plaušiniai priedai ir jų poveikis lengvojo betono savybėms	22
1.4. Poringoji keramzitbetonio struktūra ir jo atsparumas šalčiui	23
1.5. Analitinės mokslo darbų apžvalgos apibendrinimas ir disertacijos uždavinių formulavimas	26
2. NAUDOTOS ŽALIAVOS IR TYRIMŲ METODIKA	29
2.1. Tyrimų metodika	29
2.1.1. Tyrimo įranga ir metodai	29

2.1.2. Bandinių paruošimas.....	34
2.1.3. Betono mišinių sudėtys	35
2.2. Naudotų žaliavų charakteristikos ir savybės.....	37
2.2.1. Portlandcementis.....	37
2.2.2. Keramzito smėlis	39
2.2.3. Smėlis	42
2.2.4. Aktyvūs mineraliniai priedai	43
2.3. Antrojo skyriaus išvados	47
3. KERAMZITBETONIO SU KATALIZATORIAUS ATLIEKA TYRIMŲ REZULTATAI.....	49
3.1. Betono bandinių pagrindinės fizikinės ir mechaninės charakteristikos	50
3.2. Rentgenografiniai betono bandinių tyrimų rezultatai	55
3.3. Mišinių egzoterminio efekto tyrimai	60
3.4. Betono bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal pagrindinius ir išvestinius struktūros rodiklius	63
3.5. Sukietėjusio keramzitbetonio mikrostruktūros tyrimai.....	66
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	69
4. KERAMZITBETONIO SU MULITINĖS VATOS ATLIEKA TYRIMŲ REZULTATAI.....	71
4.1. Betono bandinių pagrindinės fizikinės ir mechaninės charakteristikos	71
4.2. Rentgenografiniai betono bandinių rezultatai	76
4.3. Mišinių egzoterminio efekto tyrimai	80
4.4. Betono bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal pagrindinius ir išvestinius struktūros rodiklius	84
4.5. Sukietėjusio keramzitbetonio mikrostruktūros tyrimai.....	87
4.6. Ketvirtąjo skyriaus išvados	89
BENDROSIOS IŠVADOS	91
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	93
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	105

Contents

INTRODUCTION.....	1
Formulation of the Problem	1
Importance of the Thesis	2
The Object of Research	2
The Goal of the Thesis	2
The Tasks of the Thesis.....	3
Research Methodology.....	3
The Scientific Novelty	3
Practical Significance of Achieved Results.....	4
The Defended Statements.....	4
Approval of the Results.....	4
Dissertation Structure.....	5
1. ADDITIVES INFLUENCE ON THE PROPERTIES OF EXPANDED-CLAY LIGHTWEIGHT CONCRETE.....	7
1.1. Development of the production of expanded-clay lightweight concrete	7
1.2. Influence of the compounds and structure of the expanded-clay lightweight concrete on the properties.....	10
1.3. Types of mineral additives and influence thereof.....	14
1.3.1. Influence of active mineral additives on the properties of lightweight concrete.....	15
1.3.2. Utilisation of mineral additives from waste materials.....	19
1.3.3. Nemaline additives and influence thereof on the properties of lightweight concrete	22
1.4. Porous structure of expanded-clay lightweight concrete and its frost resistance.....	23
1.5. Summary of the analytical review of scientific works and dissertation tasks formulation	26

2. USED RAW MATERIALS AND RESEARCH METHODOLOGY	29
2.1. Research methodology	29
2.1.1. Research equipment and methods.....	29
2.1.2. Preparation of samples.....	34
2.1.3. Compositions of concrete mixtures	35
2.2. Characteristics of the raw materials utilised.....	37
2.2.1. Portland cement	37
2.2.2. Expanded-clay sand.....	39
2.2.3. Sand	42
2.2.4. Active mineral additives.....	43
2.3. Conclusions of second section.....	47
3. RESULTS OF THE ANALYSIS OF EXPANDED-CLAY LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH CATALYST WASTE.....	49
3.1. Main physical-mechanical characteristics of concrete samples.....	50
3.2. X-ray analysis of concrete samples	55
3.3. Analysis of the exothermic effect of mixtures.....	60
3.4. The prediction of exploitative frost resistance of concrete samples according the main and derivative structure's parameters.....	63
3.5. Microstructure analysis of the hardened expanded-clay lightweight concrete	66
3.6. Conclusions of third section	69
4. RESULTS OF THE ANALYSIS OF EXPANDED-CLAY LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH MULLITE WOOL.....	71
4.1. Main physical-mechanical characteristics of concrete samples.....	71
4.2. X-ray analysis of concrete samples	76
4.3. Analysis of the exothermic effect of mixtures.....	80
4.4. The prediction of exploitative frost resistance of concrete samples according the main and derivative structure's parameters.....	84
4.5. Microstructure analysis of the hardened expanded-clay lightweight concrete	87
4.6. Conclusions of fourth section	89
GENERAL CONCLUSSIONS.....	91
REFERENCES	93
LIST OF THE AUTHORS SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION.....	105

Ivadas

Problemos formulavimas

Monolitinių, o ypač surenkamųjų stambiaplokščių namų statybai Lietuvoje buvo plačiai naudojamas keramzitbetonis. Nuo 1962 m. pradėta stambiaplokščių namų statyba naudojant išorines keramzitbetonio plokštes. Lietuvoje tokio tipo namai sudaro vieną didžiausių namų grupių. Plokščių gamybą iš keramzitbetonio vykdė Vilniaus, Kauno ir Klaipėdos namų statybos kombinatai. Lietuvoje stambiaplokščių namų statyba buvo smarkiai plėtojama iki 1990 m.

Beveik prieš 30 metų Lietuvoje pradėta sparčiai plėtoti ir monolitinių gyvenamųjų namų bei kitokios paskirties pastatų statyba iš keramzitbetonio. Monolitinių namų statyba suteikė tam tikrą laisvę architektams ir teritorijų planuotojams, keičiantiems ir gerinantiems architektūrinį planinį miestų vaizdą (Русяцкас 1987).

Architektūros ir statybos institutas tyrė vidaus ir išorės veiksnių poveikį pastato vidinėms ir išorinėms keramzitbetonio sienoms statybos ir eksploataavimo metu, taip pat šiluminį pastato režimą, kitas keramzitbetonio fizikines ir mechanines savybes. Atlikti moksliniai tyrimai parodė, kad pirmaisiais namų eksploatacijos metais monolitinio keramzitbetonio sienų garso izoliacija yra blogesnė, dėl padidinto drėgnumo didesnis šilumos laidumas.

Tačiau apskritai keramzitbetonio gaminiai turi daug pranašumų: yra lengvi, gana atsparūs ugniai, šalčiui. Plokštės naudojamos daugiaaukščių pastatų laiknčiosioms išorinėms sienoms, vidaus pertvarų statybai ir kt.

Statybinių medžiagų įvairovė, besiplečianti nekilnojamojo turto rinka ir žmonių poreikiai paskatino kurti naujus gaminius, savo savybėmis pralenkiančius įprastų gaminių savybes. Medžiagų savybėms modifikuoti į betonus dedama įvairių atliekų (malto kalkakmenio, lakiųjų pelenų, aukštakrosnių šlako, silicio mikrodulkių, katalizatorių iš naftos pramonės ir kt.).

Šiuo metu pasiekta efektyvių statybinių medžiagų iš technogeninių ir pramonės atliekų gamybos pažanga, tačiau naudojimo klausimai sprendžiami mažesniu mastu. Taupant gaminius išteklius, reikia plačiau naudoti pigesnes žaliavas, t. y. įvairių pramonės šakų atliekas. Tokios atliekos vadinamos technogeninėmis žaliavomis.

Darbo aktualumas

Nemažai mokslinių tyrimų lengvojo betono srityje atliekama nuo 1960 metų. Mokslininkai daug dėmesio skyrė žaliavų parinkimui, priedams, jų savybėms, keramzitbetonio gamybos būdams, gaminių formavimo, tankinimo režimams, terminio apdorojimo būdams ir kt.

Šiuo metu itin aktualu gaminant lengvąjį betoną naudoti įvairias atliekas, todėl darbe buvo pasirinkti du aktyvūs mineraliniai priedai: katalizatorius iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus (KAT) ir nedegta mulitinė vata (MV), kurių galimybės naudoti keramzitbetonio gamyboje iki šiol netirtos.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – aktyviųjų mineralinių priedų (katalizatoriaus iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus ir nedegtos mulitinės vatos) įtaka pagrindinėms keramzitbetonio charakteristikoms (tankiui, gniuždymo stipriui, vandens įmirkiui ir kt.).

Darbo tikslas

Pagrindinis šio darbo tikslas – ištirti aktyvius mineralinius priedus, susidarantiuosius katalitinio naftos krekingo reaktoriuje (KAT) ir nedegtą mulitinės vatos plokščių šlifavimo metu (MV), panaudoti jas keramzitbetonio kompozicijose ir nustatyti aktyviųjų mineralinių priedų poveikį keramzitbetonio savybėms, bei

parinkti keramzitbetonio su šių atliekų priedu mišinių sudėtis ir nustatyti naudojimo galimybės.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti naudojamų žaliavų ir aktyviųjų mineralinių priedų – nemalto katalizatoriaus iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus ir nedegtos, nedisperguotos mulitinės vatos – savybes.
2. Nustatyti aktyviųjų mineralinių priedų kiekio poveikį keramzitbetonio fizikinėms ir mechaninėms savybėms.
3. Ištirti aktyviųjų mineralinių priedų poveikį cemento hidratacijos mechanizmui kompozitiniuose gaminiuose.
4. Nustatyti keramzitbetonio bandinių su priedais pagrindinius ir išvestinius struktūros rodiklius, apskaičiuoti prognozuojamą eksploatacinį atsparumą šalčiui.
5. Remiantis tyrimų rezultatais parinkti geriausius nemalto katalizatoriaus iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus ir nedegtos, nedisperguotos mulitinės vatos atliekos kiekius keramzitbetonio mišiniuose.

Tyrimų metodika

Naudotų žaliavų ir bandinių savybių tyrimams buvo taikyti standartiniais metodais atlikti fizikiniai ir mechaniniai tyrimai. Struktūros tyrimams atlikti buvo taikyti optinės mikroskopijos, skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM), rentgenografinės ir egzotermijos analizės metodai.

Darbo mokslinis naujumas

Nustatyta galimybė gaminti keramzitbetonio gaminius iš klinties portlandcementinio, natūralaus smėlio, keramzito smėlio bei aktyviųjų mineralinių KAT ir MV priedų. Pirmą kartą įvertintas keramzitbetonio bandinių su KAT ir MV atliekų priedais ilgaamžiškumas pagal prognozuojamąjį eksploatacinį atsparumą šalčiui. Sukurtas pakankamo stiprumo ir mažo tankio keramzitbetonis panaudo-

jus KAT atlieką ir mažesnę cemento kiekį. Nustatyti kai kurie cemento hidratacijos ypatumai keramzitbetonio su aktyviais mineraliniais priedais mišiniuose.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Geriausių sudėčių keramzitbetonis, pakeičiant dalį cemento KAT ir MV atliekomis, gali būti naudojamas mažaaukščių ir aukštybinių pastatų statyboje kaip konstrukcinė-termoizoliacinė medžiaga, tinkama naudoti agresyviomis Lietuvos klimato sąlygomis.

Ginamieji teiginiai

1. Naudojant žaliavas (portlandcementį, natūralų smėlį, keramzito smėlį) ir geriausią aktyviųjų mineralinių priedų kiekį, pakeičiant dalį cemento nemalto katalizatoriaus iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus atlieka, galima gaminti keramzitbetonį, kuris turės didesnes gniuždymo stiprio vertes ir bus atsparesnis šalčiui.
2. Nemalto katalizatoriaus iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus atlieka keramzitbetonio mišiniuose keičia portlandcemenčio hidratacijos procesą. Didinant katalizatoriaus atliekos kiekį (iki 30 %) sumažėja maksimalios temperatūros pasiekimo trukmė.
3. Nedegta ir nedispersuota mulitinė vata sulėtina portlandcemenčio hidratacijos procesą dėl vandens trūkumo, tačiau yra tinkama sumažinto šilumos laidumo koeficiento keramzitbetonio gamybai.
4. Aktyviųjų mineralinių priedų kiekį keramzitbetonio mišiniuose tikslin- ga optimizuoti pagal jo tankio, gniuždymo stiprio, atsparumo šalčiui ki- timo tendencijas ir šilumos laidumo koeficientą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbtos dvi mokslinės publikacijos recenzuojamuose peri- odiniuose mokslo leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto ISI duomenų bazę. Vienas straipsnis recenzuojamame tarptautinės konferencijos straipsnių rinkinyje ir du straipsniai INSPEC tarptautinėje duomenų bazėje refe- ruojamuose leidiniuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šešiose mokslinėse konferencijose:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2007 m. Vilniuje;
- Respublikinėje konferencijoje „Medžiagų inžinerija“ 2009 m. Kaune;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2009 m. Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2010 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“ 2010 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Modern concrete and reinforced concrete“ 2011 m. Minske.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir disertacijos autorės publikacijų sąrašai.

Darbo apimtis – 120 puslapis, tekste panaudotos 6 numeruotos formulės, 50 paveikslų ir 21 lentelė. Rašant disertaciją naudotasi 170 literatūros šaltiniais.

Priedų poveikis keramzitbetonio savybėms

1.1. Keramzitbetonio gamybos raida

Šiuolaikinė statyba neįsivaizduojama be lengvojo betono. Jis yra viena populiariausių statybinių medžiagų. Lengvasis betonas priskiriamas prie sudėtinių kompozicinių medžiagų ir naudojamas įvairiomis eksploatacijos sąlygomis, turi neribotus žaliavų šaltinius, o jo kaina yra palyginti nedidelė. Pabrėžtina, kad statiniai, kurių statybai naudotas ir lengvasis betonas, pasižymi architektūriniu grožiu ir paprastumu. Gaminant lengvuosius betonus galima naudoti vietines žaliavas, pramonės ir technogenines atliekas.

Per paskutinius XX a. dešimtmečius lengvojo betono gamybos technologijos vystėsi gana sparčiai, buvo pradėtos naudoti naujos rišamosios medžiagos, efektyvesni modifikatoriai ir aktyvieji mineraliniai priedai, į formavimo masę dažniau dedama armavimo plaušų, taikomi nauji technologiniai gamybos būdai ir metodai. Mokslas apie lengvąjį betoną taip pat pažengė į priekį: buvo aktyviai nagrinėjama lengvojo betono struktūra, jos formavimasis ir savybės, atsirado galimybė prognozuoti produkto savybes, valdyti jo charakteristikas, sėkmingai vystėsi kompiuterinis betono projektavimas ir automatizuotas technologinių procesų valdymas.

Nuo 1957 m. buvusioje Tarybų Sąjungoje (TSRS) pradėtas naudoti keramzitbetonis. Iš jo buvo gaminami stambiagabaričiai armuoti gaminiai. Maskvos (Rusija) betono ir gelžbetonio mokslinių tyrimų institute buvo pradėti keramzitbetonio savybių tyrimai, siekiant šią medžiagą pritaikyti įvairios paskirties pastatų išorinių ir laikančiųjų konstrukcijų gamybai. Tokiam betonui gaminti reikia didelių keramzito kiekių, todėl buvo sukurta ir išvystyta keramzito gamybos pramonė, kuri jau 1962 m. pateikė apie 2,8 mln. m³ keramzito (АСиА НИИЖБ 1963).

Lietuvoje AB „Palemono keramika“ gamykloje 1961 m. buvo įkurtas pirmas keramzito gamybos cechas, kuris pagamindavo 100 tūkst. m³ keramzito. Palemono keramzitas buvo gaminamas plastiniu ir šlapiu būdu. 1969 m. gamykla pagamindavo 170 tūkst. m³ keramzito. Vidutinė pagaminto keramzito granulometrinė sudėtis buvo tokia: 0–5 mm – 8 %, 5–10 mm – 22 %, 10–20 mm – 57 % ir 20–40 mm – 13 % (Ярулайтис, Навицкас 1970). Šioje gamykloje keramzitbetonio blokelių gamyba pradėta 1990 m. ir vyksta iki šiol.

Ignalinos statybinių medžiagų kombinatas, veikęs 1974–1995 m., buvo vienas iš stambiausių statybinių medžiagų gamybos objektų respublikoje. 1982 m. Ignalinos SMK buvo atiduotas eksploatuoti keramzito cechas, kurio pirmoji eilė veikė nuo 1981 m. Keramzito granulės buvo ruošiamos plastiniu būdu. 1998 m. gamykla baigė savo veiklą (Ласис, Ярулайтис, Станайтис 1985).

UAB „Saint-Gobain statybos gaminiai“ „Fibo“ keramzitą gamina Suomijoje. „Fibo“ 3 ir 5 MPa keramzitbetonio blokeliai gaminami Estijoje vibracinio presavimo būdu iš keramzito, cemento ir vandens (maxit lt 2011).

Buvusioje Tarybų Sąjungoje 1958 m. pastatyti pirmieji gyvenamieji namai, kurių išorės sienos buvo iš keramzitbetonio blokų. Iki 1961 m. keramzitbetonio blokų, skirtų išorės sienoms, storis siekė 400 mm. Tobulinant keramzito ir keramzitbetonio gamybos technologijas buvo gautas 1000 kg/m³ tankio keramzitbetonis, todėl Maskvos (Rusija) statybinės fizikos mokslinių tyrimų institute buvo pasiūlyta išorinių sienų blokų storį sumažinti iki 350 mm. Vėliau pagerinus fizikines ir mechanines keramzitbetonio savybes, jo tankis buvo sumažintas iki 950 kg/m³, toks tankio sumažinimas leido pradėti gaminti plokštes, kurių storis siekė 300 mm. Atliekant tolesnius šios medžiagos tyrimus, buvo gautas dar mažesnio tankio keramzitbetonis (800 kg/m³), iš šios medžiagos pagamintų blokų storis tesiekė 260 mm. Naudojant tokias plokštes penkių aukštų blokiniai namai (80 butų) vidutiniškai buvo pastatomi per 3–4 mėnesius. Tuo metu naudojamos sieninės plokštės iš keramzitbetonio leido sumažinti sienų svorį net 60 %, kartu sumažėjo apkrovos, tenkančios laikančiosioms konstrukcijoms, taip buvo taupoma armatūra ir cementas (Чентемиров, Горных 1963).

Lietuvoje viensluoksnės keramzitbetonio plokštės išorės sienoms buvo pradėtos gaminti nuo 1962 m. trečiojo ketvirčio Vilniaus gelžbetoninių konstrukcijų gamykloje Nr. 1. Gaminant plokštes šioje gamykloje, dalis keramzito smėlio

buvo keičiama kvarciniu smėliu, nes tuo metu keramzito gamyklos keramzito smėlio gamino nepakankamai. Dėl šių priežasčių gaminamų keramzitbetonio plokščių tankis buvo didesnis – jis siekė 1000–1100 kg/m³. Iš tokios tankesnės medžiagos buvo gaunamos 350 mm storio, 50 markės plokštės. Joms gaminti buvo naudojamas keramzito žvirgždas, kurio piltinis tankis – 430–480 kg/m³ (5/10 frakcija) ir 320–370 kg/m³ (10/20 frakcija). Pagaminti 1 m³ keramzitbetonio buvo sunaudojama: 220 kg portlandcemenčio (500 markė); keramzito skaldos: 0,44 m³ (5/10 frakcija), 0,52 m³ (10/20 frakcija); smėlio 0,40 m³ (0/5 frakcija) ir 140–150 l vandens. Tuo metu atlikti tyrimai parodė, kad pagerinus Palemono gamykloje gaminamų keramzito grūdelių kokybę galima pagaminti 50 markės keramzitbetonį, kurio tankis 850–900 kg/m³, naudojant 170 kg/m³ portlandcemenčio, kurio markė 500. Šių plokščių storis turėjo siekti 250–300 mm. Atliktais tyrimais taip pat įrodyta, kad pragarintų gaminių stipris padidėja nuo 4,6 iki 4,8 MPa (Любецкис 1964).

1969 m. Vilniaus namų statybos kombinate pagaminto 50 markės keramzitbetonio, kietėjusio 28 paras, gniuždymo stipris buvo 5,35 MPa, vidutinis tankis 1010 kg/m³, 75 markės keramzitbetonio gniuždymo stiprio vertės siekė 7,34 MPa ir tankis 1075 kg/m³ (Аксомитас 1970).

Šiuo metu Lietuvoje keramzito gaminama mažai (tik apie 12 tūkst. m³/metus), tačiau šios medžiagos poreikis nuolat auga. Potencialūs gamybiniai pajėgumai yra dideli, tačiau neefektyvūs ekonominiu požiūriu. Keramzito gamybą reikia modernizuoti, pakeisti senos konstrukcijos krosnis į šiuolaikines – rotacines, diegti ypač lengvų užpildų gamybą.

Labai sugriežtėjus šiluminiais reikalavimams pastatų atitvaroms keramzitbetonis šiuo metu naudojamas kartu su papildoma šilumine izoliacija. Todėl šiuo metu mažiau aktualūs keramzitbetonio tankio mažėjimo klausimai, ir į pirmą vietą iškyla keramzitbetonio stiprumo klausimai, norint sunaudoti mažiau medžiagų ir suploninti pastatų atitvaras. Gaminant plonasienes konstrukcijas aktualus smulkiagrūdžio keramzitbetonio (užpildo dalelių dydis iki 1 mm) naudojimas. Smulkiagrūdis keramzitbetonis ir buvo tiriamas atliktuose tyrimuose.

Naudojant keramzitbetonį pastatų atitvarų išoriniuose sluoksniuose arba transporto statiniuose (Janavičius 2008) ypač aktualūs keramzitbetonio ilgaamžiškumo Lietuvos klimato sąlygomis klausimai.

Atsižvelgiant į minėtas aplinkybės šiame darbe pateikiamuose tyrimuose buvo naudojamas didesnio tankio ir stiprumo keramzitbetonis, daug dėmesio buvo kreipiamą į šio betono atsparumą šalčiui.

1.2. Keramzitbetonio sudėtinių dalių ir sandaros įtaka savybėms

Pavadinimu „keramzitbetonis“ nusakomas betonas, pagamintas iš keramzito žvirgždo arba skaldos. Keramzitbetonis – tai sukietėjęs mišinys, kurį sudaro rišamoji medžiaga, vanduo ir keramzito užpildai. Keramzitbetonio tankis daugiausia priklauso nuo betono struktūros. Esant smulkiam užpildui – smėliui, gaminant tokį betoną gali būti naudojamas keramzito smėlis arba kitos porėtų smėlių rūšys (АСиА НИИЖБ 1963).

Keramzitas – tai dirbtinė biri, lengva, akyta keraminė medžiaga, kurios granulės yra apvalios formos, o paviršius aptrauktas sukepusia luobele. Granulės viduje vyrauja uždarnos poros. Keramzito granulės porų sienelės – iš stikliškosios medžiagos, sienelių storis – nuo keliolikos mikronų iki 1 mm (Naujokaitis 2006).

Kadangi nuo naudojamų priedų priklauso keramzitbetonio gaminių savybės, tai pagal užpildus ir priedus keramzitbetonio sandara pateikta 1.1 paveiksle.

1.1 pav. Keramzitbetonio sandara

Fig. 1.1. Structure of expanded-clay lightweight concrete

Iš technologiško betono mišinio galima gaminti įvairios formos ir matmenų ilgaamžės statybines konstrukcijas arba betono gaminius. Reguluojant betono mišinio sudėtį, betonui galima suteikti norimų savybių (Nagrockienė, Žurauskienė 2007).

Mokslininkas (Виноградов 1979) teigia, kad betono savybės galima apibūdinti trimis struktūros elementais: cementiniu akmeniu, užpildais ir kontakto sluoksniu tarp jų. Kontakto sluoksnis lemia betono monolitiškumą, plastiškumą

ir stiprumą. Kai V/C vertės didelės, betono mišinys gali išsisluoksniuoti, atsirasti defektinių zonų ir tuštumų ties stambųjų užpildų dalelėmis. Naudojant keramzitą kaip užpildą lengviesiems betonams gaminti, poringa jo masė pradeda įgerti vandenį maišant. Kai iš skystos cementinės teslos išsiskiria vandens perteklius, kartu su vandeniu į paviršutines keramzito poras skverbiasi ir smulkios cemento dalelės.

Monografijoje (Deltuva 1998) teigiama, kad sumaišius cementą su vandeniu, prasideda fizikiniai ir cheminiai procesai: hidratacija, koloidacija, kristalizacija. Visi šie procesai yra svarbūs, tarpusavyje susiję ir turi įtakos galutinio produkto fizikinėms ir mechaninėms savybėms: stiprumui, deformatyvumui, cheminiam atsparumui, atsparumui šalčiui ir vandens bei dujų pralaidumui. Kitame savo darbe Deltuva (2001) teigia, kad betono stiprumą galima užtikrinti įvairiais būdais – keičiant mišinio sudėtį, ypač vandens ir cemento santykį, užpildų granulimetrinę sudėtį ir taikant specialias technologines priemones.

Tyrėjai (Спивак, Баулин, Баджагян 1965) savo darbe parodė, kad tankiaime keramzitbetonyje smėlio 1,2/5 frakcijos grūdėliai išskleidžia keramzito skaldos daleles, padidindami erdvę tarp grūdelių. Todėl šią frakciją naudinga atmesti arba panaudoti su apribojimais tais atvejais, jeigu betonas turi didesnį smulkiųjų frakcijų kiekį.

Kai keramzitbetonyje V/C santykis keičiasi nuo 0,5 iki 0,38, gniuždymo stipris padidėja 19 %. Mokslininkai (Агеев, Щеканенко, Заботин 1963) nustatė, kad keičiant cemento kiekį betone nuo 315 iki 533 kg/m³, gniuždymo stipris padidėja 46 %, tamprumo modulis – 16 %, o keramzitbetonio bandinių tankis – 7 %. Šituose tyrimuose 5/20 frakcijos keramzito žvyro piltinis tankis svyravo nuo 325 iki 700 kg/m³, o keramzito kiekis betone svyravo iki 390 kg/m³. Kai sumažėja keramzito žvyro kiekis betone, bandinių stipris padidėja 233 %, deformacijos modulis – 59 % ir tankis – 55 %. Pagrindinis veiksnys, lemiantis keramzitbetonio stiprį ir deformatyvumą, yra keramzito ir keramzitbetonio tankis.

Lietuvos mokslininkai (Гоберис, Пундене 2002) savo tyrimuose parodė galimybę padidinti karščiui atsparaus keramzitbetonio stiprumo charakteristikas, naudojant mažesnę cemento kiekį. Dalis cemento (iki 5 %) buvo pakeista silicio mikrodulkėmis. Tyrimams buvo naudotas Palemono gamyklos 0/5 frakcijos ir 5/10 frakcijos keramzitas. Keramzito piltinis tankis atitinkamai buvo: 720 ir 640 kg/m³. Tyrimai parodė, kad kuo daugiau betone yra silicio mikrodulkių, tuo didesnis bandinių gniuždymo stipris. Kaip parodė rentgenografiniai tyrimai keramzitbetonyje, be silicio mikrodulkių, pagrindinis hidratacijos produktas yra CAH₁₀. Galima teigti, kad keramzitbetonyje susidaro daugiau kalcio hidroalumosilikatų ir tuo paaiškinamas didesnis jo stiprumas. Didėjant silicio mikrodulkių kiekiui iki 5 %, padidėja keramzitbetonio tankis po kietinimo, džiovinimo ir degimo, nes tankėja jo struktūra.

Keramzitbetonio gniuždymo stipriui didelį poveikį daro technologiniai veiksniai, t. y. keramzitbetonio gamybos būdas, mišinio klojimas, tankinimo režimas, terminio apdorojimo būdai ir t. t. Literatūroje apie keramzitbetonio gamybą galima rasti prieštaringų rekomendacijų dėl išankstinio užpildų sudrėkinimo. Vieni autoriai siūlo, kad stambus užpildas (keramzitas) būtų sudrėkintas vandeniu. Kiti nurodo, kad toks veiksmas nėra efektyvus (АСиА НИИЖБ 1963).

Norint nustatyti stambaus užpildo drėgmės poveikį keramzitbetonio gniuždymo stipriui, buvo atlikti specialūs eksperimentai ir nustatytas betono, pagaminto iš šlapio ir sauso keramzito, stipris. Tam buvo pagaminti $15 \times 15 \times 15$ cm bandiniai. Skirtumas tas, kad vienu atveju dalis vandens jau buvo keramzite (keramzitas buvo mirkomas vandenyje 18 val.), kitu – vanduo buvo pilamas į mišinį maišant. Atlikus tyrimus keramzitbetonio bandiniai parodė praktiškai vienodas gniuždymo stiprio vertes. Keramzitbetonio mišinį, kaip ir bet kokį kitą lengvojo betono mišinį, pagamintą iš poringųjų užpildų, reikia atsargiai maišyti. Ištirtas maišymo trukmės poveikis betono stipriui: keramzitbetonio mišinys buvo maišomas 1, 3, 5, 10 ir 15 min. Tyrimai parodė, kad visų mišinių, kurie buvo maišomi 1 min, stiprio vertės buvo mažiausios. Geriausi rezultatai gauti, kai keramzitbetonio mišinys buvo maišomas 5 min. Ilgesnis mišinio maišymo laikas duoda nedidelį efektą. Buvo nustatyta, kad vibravimui užtenka 1 min. Ilgalaikis keramzitbetonio mišinio vibravimas nepadidina keramzitbetonio stiprio, o tik skatina mišinį išsisluoksniuoti (АСиА НИИЖБ 1963).

Kadangi keramzito kaina gerokai didesnė už kvarcinio smėlio kainą, didesnio stiprumo keramzitbetonio sudėtis turi būti apskaičiuota su minimaliu keramzito kiekiu, reikalingu pasiekti reikiamą betono tankį (Довжик, Дорф, Петров 1976).

Mokslininkai (Gumuliauskas, Skripkiūnas 2007), ištyrę smėlingąjį betoną, patvirtino, kad ši betono atmaina daugeliu atvejų pranoksta įprastinį betoną – yra technologiškesnė, o visos jos savybės panašios arba pranašesnės. Be to, smėlingasis betonas yra ekonomiškesnis, nes jo sudėtis tokia, kad nepereikvojant cemento, taupomi stambieji užpildai. Kiti (Brouwers, Radix 2005), gamindami betoną, naudojo trijų frakcijų smėlį. Pateikiami tyrimo duomenys rodo, kad mišinys, kuriame buvo naudotas smulkusis smėlis (0/1 frakcija), pasiekė didžiausią gniuždymo ir lenkimo stiprį.

Stambiaporio smėlio vandens poreikis – 4–6 % (nuo masės), vidutinio – 6–68 %, smulkiojo – 8–60 % ir labai smulkaus – daugiau nei 10 % (Горчаков *et al.* 1976). Iš šitų duomenų galima spręsti, kad smulkusis smėlis ekonomiškai nenaudingas, nes siekiant užtikrinti reikalaujamą betono stiprumą V/C santykis turi išlikti pastovus, kadangi dėl didėjančio vandens poreikio daugiau sunaudojama cemento.

Fizikiniai ir cheminiai cemento kietėjimo procesai plačiai tyrinėjami jau daugiau kaip šimtą metų (Тейлор 1969; Кузнецова, Кудряшов, Тимашев 1989; Сычев 1974; Мчедлов-Петросян 1988).

Lo, Tang, Cui (2007) tyrė keramzitbetonį, kurio stambūs užpildai buvo 5, 15 ir 25 mm skersmens. Tyrimai parodė, kad didžiausią gniuždymo stiprį pasiekė bandiniai, kietėję 28 paras ir turintys 15 mm keramzito. Jie teigė, kad betono stipris su lengvaisiais užpildais priklauso nuo naudotų lengvųjų užpildų stiprio ir nuo sukietėjusios cemento teslos. Tyrimams naudotų užpildų atsparumas trupinimui buvo 4,27, 5,79 ir 1,69 MPa. Kai kurie mokslininkai (Pioro, Pioro 2004), ištyrę keramzitą, nustatė, kad tyrimuose naudoto keramzito atsparumas trupinimui gali kisti nuo 0,78 MPa iki 14,4 MPa.

Chia, Zhang (2004) savo darbe panaudojo 4/8 frakcijos keramzitą, jo tankis – 650 kg/m^3 . Bandinių tankis kito nuo 1535 iki 1850 kg/m^3 , gniuždymo stipris – nuo 29,0 iki 50,6 MPa.

Tyrėjai (Бужевич *et al.* 1964) įrodė, kad keramzitbetonyje panaudojus cemento daugiau nei 400 kg/m^3 , smėlio rūšis, jo granulimetrinė sudėtis ir granulimetrinė keramzito žvyro sudėtis daro mažą įtaką keramzitbetonio stiprumui.

Rusijos mokslininkų patente (Rusin, Dolgikh 1999) pateikta keramzitbetonio mišinio sudėtis buvo tokia: cemento – $65\text{--}85 \text{ kg/m}^3$, keramzito 20/40 frakcijos – $400\text{--}500 \text{ kg/m}^3$, vandens – $30\text{--}40 \text{ l/m}^3$. Poringo keramzitbetonio bandinių, kietėjusių 28 paras, gniuždymo stipris – tik 1–2 MPa.

Patente (Narullin, Tikhonov 1998) nurodyta tokia keramzitbetonio sudėtis: portlandcemenčio – 11,6–16,2 %, smulkaus keramzito – 48,7–65,6 %, stambiaus keramzito – 31,0–33,1 %, vanduo sudaro likusiąją dalį. Šių Rusijos autorių konstrukcinio keramzitbetonio vidutinis tankis – $1475\text{--}1527 \text{ kg/m}^3$, bandiniai priklauso B 7,5–B 12,5 stiprio klasei.

Patente (Ajrapetov, Kharchenko, Uzhakhov 1991) siūloma išnaudoti keramzitbetonio stiprio padidėjimą ir sumažinti cemento kiekį, naudoti mažo stiprio keramzitą. Tokiu būdu sutaupyto cemento kiekis sudarys $80\text{--}100 \text{ kg/m}^3$. Keramzitbetonio sudėtis būtų tokia: cemento – 300 kg/m^3 , keramzito – 640 kg/m^3 , smėlio – 180 kg/m^3 , vandens – 200 l/m^3 . Bandinių gniuždymo stipris – 30 MPa, tankis – $1100\text{--}1200 \text{ kg/m}^3$.

Patente (Maksimov, Chelokidi 1987) keramzitbetonį sudaro tokie komponentai: cemento – 300 kg/m^3 , keramzito – 360 kg/m^3 , smėlio – 710 kg/m^3 , vandens – 240 l/m^3 . Šio patento išradimo tikslas – padidinti keramzitbetonio stiprį sumažinus cemento kiekį. Gautos tokios bandinių savybės: tankis – 1200 kg/m^3 , gniuždymo stipris – 11 MPa.

Išnagrinėjus kitų mokslininkų tyrimų rezultatus pastebėta, kad, panaudojus keramzitbetonyje mažą kiekį portlandcemenčio (iki 85 kg/m^3), bandinių gniuždymo stipris siekia tik 1–2 MPa.

Naujokaitis (2007) akcentavo, kad užpildai sumažina brangių rišamųjų medžiagų masę, pagerėja techninės betono savybės, t. y. padidėja stiprumas, tampumas, sumažėja deformatyvumas, valkšnumas, suteikiama specifinių savybių.

1.3. Mineralinių priedų rūšys ir jų įtaka

Priedai – tai mineralinės arba organinės medžiagos, kurių pridedama nedideliais kiekiais ruošiant mišinius jų technologinėms savybėms, sukietėjusio mišinio savybėms arba kietėjimo procesui reguliuoti.

Mineraliniai priedai būna smulkiai sumaltų miltelių (iki cemento smulku-
mo arba didesnio) pavidalo mineralinės medžiagos. Mineraliniai priedai skirstomi į:

- 1) aktyvūs mineralinius;
- 2) mikroužpildus.

Aktyvūs mineraliniai priedai – tai smulkiai sumaltos medžiagos, įmaišomos ruošiant mišinius ir turinčios įtakos rišiklio kietėjimo procesams bei keičiančios mišinių ar sukietėjusios medžiagos savybes. Šie priedai kitaip dar vadinami pucolaniniais arba hidrauliniiais (Skripkiūnas 2007).

Aktyvūs mineraliniai priedai skirstomi į:

- 1) gamtinius;
- 2) dirbtinius.

Gamtiniai priedai gaunami iš vulkaninės arba nuosėdinės kilmės uolienų ir atitinkamai skirstomi į vulkaninės kilmės gamtinius mineralinius priedus ir nuosėdinės kilmės gamtinius mineralinius priedus. Dirbtiniai aktyvūs mineraliniai priedai gaunami iš pramonės atliekų (Skripkiūnas 2007).

k vertė taikoma II tipo neorganiniams priedams, atsižvelgiant į:

- vandens ir cemento santykio termino pakeitimą vanduo / (cementas + $k \times$ įmaiša) santykiu;
- cemento mažiausio kiekio reikalavimą.

Tikroji k vertė priklauso nuo priedo tipo. Didžiausias lakiųjų pelenų kiekis, atsižvelgiant į k vertės sąvoką, turi atitikti šį reikalavimą:

- lakieji pelenai ir cementas $\leq 0,33$ pagal masę;
- silicinės mikrodulkės ir cementas $\leq 0,11$ pagal masę (LST EN 206-1:2002).

Mineraliniai betono priedai – tai dispersinės būklės gamtinės ar technogėninės medžiagos (daugiausia neorganinės sudėties bei netirpstančios vandenyje – pagrindinis skirtumas nuo cheminių priedų), apibūdinamos dalelių stambumu, kurios mažesnės nei 0,16 mm (pagrindinis skirtumas nuo užpildų). Betone panaudojus mineralinius priedus, bandinių stiprumas net su nepakitusiu arba didėjančiu V/C santykiu padidėja (Прохоров 2004).

Shannag (2011) paskelbė, kad lengvajame betone dalį rišamosios medžiagos pakeičiant 5–15 % silicio mikrodulkėmis, gniuždymo stipris padidėja iki 57 %, o tamprumo modulis iki 14 %, atitinkamai lyginant su bandiniais be atliekos. Tačiau įterpiant į tos pačios sudėties mišinį 10 % lakiųjų pelenų (nuo cemento masės), bandinių gniuždymo stipris sumažėja apie 18 %.

Gaminant lengvuosius didesnio tankio betonų vietoje dalies rišamosios medžiagos galima naudoti mineralinius priedus. Tokiu mineraliniu priedu gali būti ir technogeninė atlieka – katalitinio krekingo reaktoriuje naudotas katalizatorius ir mulitinės vatos atliekos.

Katalizatoriai iš naftos kompanijų priskiriami prie betono priedų, nes jie susideda iš silicio dioksido bei aliuminio oksido ir veikia kaip pucolanai (Pacewska *et al.* 2002a; Pacewska *et al.* 2002b; Pacewska, Wilinska, Bukowska 2000; Paya *et al.* 2003a; Zornoza *et al.* 2007; Zornoza *et al.* 2009).

Kaip rodo bandymai (Chen, Liu 2008), panaudojus lengvajame betone lakiuosius pelenus, aukštakrosnių šlaką ir silicio mikrodulkes, bandinių tankis svyravo nuo 1523 kg/m^3 iki 1624 kg/m^3 , gniuždymo stipris po 28 parų – nuo 43,4 MPa iki 61,0 MPa.

Mulitinės vatos atliekos būna degtos ir nedegtos. Pagrindinis atliekos mineralas yra mulitas $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, taip pat amorfinis SiO_2 (KTM-3 Umega 2011).

Nedegtos mulitinės vatos atliekos taip pat gali būti priskiriamos mineraliniams priedams, o pagal savo poveikį cemento hidratacijos proceso metu – aktyviems mineraliniams priedams.

1.3.1. Aktyviųjų mineralinių priedų poveikis lengvojo betono savybėms

Nustatyta, kad katalizatorius, kurio cheminė sudėtis: SiO_2 – 42,12 %, Al_2O_3 – 51,27 %, Fe_2O_3 – 0,37 %, MgO – 0,99 %, Na_2O – 0,40 %, K_2O – 0,17 %, veikia betonuose kaip pucolaninė medžiaga. Tačiau norint gauti didesnio stiprio betoną, svarbu parinkti tinkamiausią pucolano kiekį (Garcia de Lomas, Sanchez de Rojas, Frias 2007). Siekiama, kad jie pagerintų betono savybes, t. y. gniuždymo stiprį, ilgaamžiškumą ir kt. (Aitcin 1998; Sanchez de Rojas, Frias 1996; Hwang, Sheen 1991; Cohen, Bentur 1988).

Kartotinai panaudoję katalizatoriaus atlieką, kurios cheminė sudėtis tokia: SiO_2 – 45,06 %, Al_2O_3 – 32,91 %, Fe_2O_3 – 3,04 %, CaO – 2,30 %, MgO – 1,10 %, SO_3 – 8,09 %, Na_2O – 0,37 %, K_2O – 0,06 %, ir pakeitę mišinį 5 %, 10 % ir 15 % cemento katalizatoriaus atlieka, mokslininkai (Su *et al.* 2000) nustatė, kad naudojant 15 % šio priedo gniuždymo stipris padidėja net 15 %, palyginus su kontroliniais bandiniais.

Paya, Monzo, Borrachero (2001) cementą pakeitė 6 %, 10 %, 15 % ir 20 % katalizatoriaus atlieka. Priedo cheminė sudėtis buvo tokia: SiO_2 – 48,20 %, Al_2O_3 – 51,27 %, Fe_2O_3 – 0,37 %, MgO – 0,99 %, Na_2O – 0,40 %, K_2O – 0,17 %.

$\text{CaO} < 0,01 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 46,0 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,95 \%$, $\text{MgO} < 0,01 \%$, $\text{Na}_2\text{O} - 0,50 \%$, $\text{K}_2\text{O} < 0,01 \%$, $\text{SO}_3 - 0,04 \%$, $\text{TiO}_2 - 1,65 \%$. Betono mišinių, kuriuose buvo panaudota 15–20 % katalizatoriaus atliekos, bandinių gniuždymo stiprio vertės gautos didesnės, lyginant su kontroliniais bandiniais.

Tyrėjai (Guemadi *et al.* 2008) cementą pakeitė nuo 5 % iki 40 % maltu kalkakmenio (CaCO_3) užpildu. Tyrimai parodė, kad priedas leidžia sumažinti vandens kiekį, reikalingą tos pačios konsistencijos mišiniui gauti, taip pat cemento rišimosi pradžiai ir pabaigai paankstinti. Be to, sumažėja cementinio akmens bendrasis poringumas ir atitinkamai padidėja cementinio akmens, kuriame yra kalkakmenio priedų, gniuždymo stipris. Apibendrinant galima teigti, kad 15 % malto kalkakmenio priedas turi didžiausią poveikį stiprumo rezultatams.

Katalizatoriaus atlieka, kurios cheminė sudėtis: $\text{Al}_2\text{O}_3 - 39,4 \%$, $\text{SiO}_2 - 50,1 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1,3 \%$, $\text{SO}_x - 2,3 \%$, $\text{CaO} - 0,5 \%$, $\text{MgO} - 0,49 \%$, $\text{Na}_2\text{O} - 0,2 \%$, $\text{K}_2\text{O} - 0,07 \%$, $\text{Mn}_2\text{O}_3 - 0,06 \%$, gali būti naudojama ugniai atspariuose betonuose. Mūsų šalies mokslininkai (Stonys *et al.* 2008) įrodė, kad mišiniuose su 2 % ir 5 % katalizatoriaus betono stiprio charakteristikos padidėja 25 %.

Katalizatorius, kurio cheminė sudėtis buvo tokia: $\text{Al}_2\text{O}_3 - 45 \%$, $\text{Na}_2\text{O} - 0,2-0,3 \%$, $(\text{SiO}_2)_{179}(\text{Al}_2\text{O}_3)_3 \cdot 25\text{Al}_2\text{O}_3 - 54,7-54,8 \%$, gali būti panaudotas keraminių gaminių gamyboje (Mačiulaitis, Žurauskienė 2007; Kizinievič *et al.* 2008), taip pat kaip užpildas asfaltbetonio gamyboje arba kaip portlandcementio pucolaninis komponentas (Furimsky 1996).

Kai kurių mokslininkų (Paya, Monzo, Borrachero 1999) darbe buvo tiriamas panaudotas katalizatorius, kurio cheminė sudėtis tokia: $\text{SiO}_2 - 48,2 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 46,0 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,95 \%$, $\text{CaO} < 0,01 \%$, $\text{MgO} < 0,01 \%$, $\text{Na}_2\text{O} - 0,50 \%$, $\text{K}_2\text{O} < 0,01 \%$, o kitų tyrėjų (Su, Chen, Fang 2001) darbe panaudotas katalizatorius, kurio cheminė sudėtis yra ši: $\text{SiO}_2 - 51,69 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 41,12 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1,08 \%$, $\text{CaO} - 1,73 \%$, $\text{MgO} - 0,41 \%$, $\text{SO}_3 - 0,48 \%$, $\text{Na}_2\text{O} - 0,42 \%$, $\text{K}_2\text{O} - 0,06 \%$. Chen, Tseng, Hsu (2004) tyrimuose naudoto katalizatoriaus cheminė sudėtis buvo tokia: $\text{SiO}_2 - 47,0 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 38,0 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,64 \%$, $\text{MgO} - 0,51 \%$, $\text{SO}_3 - 5,6 \%$, o Hsu *et al.* (2001) tyrimuose naudoto katalizatoriaus cheminė sudėtis yra ši: $\text{SiO}_2 - 50,1 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 38,5 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1,37 \%$, $\text{MgO} - 0,71 \%$. Atlikti tyrimai rodo, kad naudoti katalizatoriai gali iš dalies pakeisti cemento kiekį neprarandant cementinių medžiagų kokybės.

Mokslininkai (Wu, Wu, Hsu 2003), tyrę statybinius mišinius ir skiedinius, nustatė, kad bandiniai, kuriuose vandens ir cemento santykis yra 0,25, panaudoto katalizatoriaus atliekos cheminė sudėtis yra ši: $\text{SiO}_2 - 47,0 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 38,0 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1,0 \%$, $\text{MgO} < 1,0 \%$, $\text{K}_2\text{O} < 1,0 \%$, $\text{TiO}_2 < 1,0 \%$, $\text{V}_2\text{O}_3 < 1,0 \%$, $\text{SO}_3 - 5,6 \%$. Šia atlieka pakeitus 15 % cemento, bandiniai pasiekė didžiausią gniuždymo stiprį – 92,3 MPa.

Aliumosilikatinė ceolitinė atlieka (naudotas naftos katalizatorius iš katalitinio krekingo įrenginio) dėl savo cheminės sudėties (Al_2O_3 – 39,4 %, SiO_2 – 50,1 %, Fe_2O_3 – 1,3 %, SO_3 – 2,3 %, CaO – 0,5 %, MgO – 0,49 %, Na_2O – 0,2 %, K_2O – 0,07 %, Mn_2O_3 – 0,06 %) gali būti naudojama ugniai atspariose cementinėse medžiagose. Nustatyta, kad katalizatoriaus atlieką apdorojus 1000 °C temperatūroje pasikeičia jos ceolitinė struktūra, o 1050 °C temperatūroje ši struktūra suyra (Aleksnevičius, Antonovič 2009).

Pacewska, Wilinska, Kubissa (1998) išnagrinėjo panaudoto katalizatoriaus pucolaninį aktyvumą taikydami terminį ir spektroskopinį būdą ir įrodė, kad katalizatorius geba reaguoti su kalcio hidroksidu panašiai kaip ir amorfinis silicio dioksidas.

Skystasis katalizinio krekingo katalizatoriaus likutis (FC3R) – tai atliekinė medžiaga, gaminama skystajame katalizinio krekingo (FCC) bloke naftos rafinavimo krosnyje. Jos cheminė sudėtis tokia: SiO_2 – 48,20 %, CaO < 0,01 %, Al_2O_3 – 46,0 %, Fe_2O_3 – 0,95 %, MgO < 0,01 %, Na_2O – 0,50 %, K_2O < 0,01 %, SO_3 – 0,04 %. Atlikti moksliniai tyrimai parodė didelį FC3R pucolaninį aktyvumą ne tik kalkių tešloje (Paya *et al.* 2003a), bet ir cemento tešloje (Paya *et al.* 2003b).

Teigiama aktyviųjų betono priedų įtaka betonui išnagrinėta Vektario ir Vilko (2006) darbe. Šie priedai gali ne tik sujungti betone laisvasias kalkes, kurios susidaro cementui kietėjant, bet ir gerinti betono savybes. Tyrimo metu išnagrinėta karbonatinė opoka, kurioje yra apie 40–50 % opalinės kilmės SiO_2 ir maždaug tiek pat smulkiadispersio CaCO_3 . Ištirti SiO_2 mikrodulkių ir klinties priedai. Būdamos labai aktyvios, SiO_2 mikrodulkės jau ankstyvame kietėjimo etape sudaro didelį kiekį kalcio hidrosilikatų. Pucolaninė reakcija vyksta tada, kai SiO_2 mikrodulkės, kurių savitasis paviršius gali būti net iki 20 000 m²/kg, ir jose esantis didelis amorfinio silicio oksido kiekis (paprastai apie 90 %) suriša tirpale esantį Ca(OH)_2 , kaip ir aktyvieji pucolaniniai priedai, kuriuose yra amorfinio SiO_2 . Reakcijos produktas analogiškas C_3S arba C_2S hidratacijos produktui. Nedideli mikrodulkių, įdėtų kartu su plastikliais, kiekiai nedaug pagreitina, o didesni kaip 8–10 % kiekiai lėtina cemento rišimąsi. Jos sudaro branduolinius centrus portlanditui formuotis ir veikia kaip hidratacijos katalizatoriai. Portlandito kristalai betonuose, be SiO_2 mikrodulkių priedo, išauga labai dideli ir yra orientuoti lygiagrečiai su užpildo paviršiumi.

Aktyvūs mineraliniai priedai kartais vadinami hidrauliniais priedais arba pucolanais. Svarbiausia jų sudėtinė dalis yra amorfinis SiO_2 , kurio yra daugiau kaip 50 %. Jis reaguoja su kalcio hidroksidu ir sudaro kalcio hidrosilikatus. Šie mineraliniai priedai pagerina granulimetrinę cemento sudėtį, padidina naujadarų kiekį ir tankį, atitinkamai padidėja cemento akmens stiprumas. Iš mineralinio priedo ir cemento granulimetrinių sudėčių, jų tūrių santykio galima spręsti apie mineralinių priedų poveikį. Jei mineralinis priedas yra aktyvus cemento atžvil-

giu, reikia nustatyti, kiek įtakos jis turi cemento granulimetrinei sudėčiai ir kiek geba sudaryti papildomų rišamosios medžiagos naujadarų. Šiuo atveju reikia ieškoti mineralinio priedo efektyvumo pagal du rodiklius – sistemos tankio padidėjimą dėl granulimetrinės sudėties pagerėjimo ir dėl papildomų naujadarų susidarymo. Kai mineralinio priedo dalelės apvalios, jų savitasis paviršius mažiausias. Jos kompleksiščiau susidėsto mišinyje, lengviau susitankina, mažiau reikia vandens. Mineralinio priedo efektyvumą galima apibūdinti ne naujadarų susidarymo gausa, kiek visų naujadarų, įskaitant ir cementą, tankio padidėjimu, kai mineralinių priedų dalelės užpildo tarp cemento dalelių susidariusias tuštumas. Mineraliniai priedai naudojami dviem tikslais: 1) rišamosioms medžiagoms taupyti; 2) gaminių stiprumui ir kai kuriems kitiems techniniams rodikliams pagerinti. Rišamosios medžiagos taupomos, kai cementas maišomas su to paties stambumo mineraliniais priedais. Pridėjus mineralinių priedų, padidėja cemento teslos tūris, betono mišinys tampa paslankesnis, vienalytiškesnis. Kai naudojamas smulkus mineralinis priedas, jo dalelės telpa į cemento dalelių sudarytas tuštumas, padidėja cemento akmens tankis, taigi ir stiprumas. Dedant mineralinių priedų kaip priedo prie cemento arba dalį cemento pakeičiant mineraliniais priedais, padidėja V/C santykio reikšmė mišinių reologinėms savybėms ir ypač betonų stiprumui. Todėl tiksliau nustatyti mineralinių priedų reikšmę betonų savybėms yra vienas iš aktualiausių šių dienų betono technologijos uždavinių, nes tai siejasi su medžiagų ir energetinių išteklių taupymo problemomis ir betonų ilgaamžiškumu bei patvarumu (Deltuva 1998).

Pasak Balandžio, Kaminsko, Vaickelionio (2006), priedai vadinami aktyviais, kai žemose temperatūrose (15–20 °C) gerai reaguoja su $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sudarydami kalcio hidrosilikatus, hidroferitus, hidroaluminatus ir kitus netirpius junginius. Priedai – mikroužpildai – skiriasi nuo aktyvių mineralinių priedų tuo, kad žemose temperatūrose (15–20 °C) nereaguoja su $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sąveika gali vykti tik autoklavuose sočių garų aplinkoje (174–203 °C). Toks priedas yra smulkiai maltas smėlis. Kiti mikroužpildai yra smulkūs dolomito arba klinties milteliai. Panaudojus mikroužpildų priedus, sumažinamos cemento sąnaudos.

Eksperimentiniai duomenys rodo (Deltuva, Rudžionis 1997a, 1997b), kad naudojant aktyviuosius mineralinius priedus betono stiprumas padidėja ne visuomet vienodai. Todėl būtina skirti, kiek padidėja stiprumas dėl cemento akmens tankio padidėjimo pagerėjus jo granulimetrinei sudėčiai ir kiek dėl papildomų hidrosilikatų susidarymo.

Aktyvūs mineraliniai priedai (pucolanai) skiriasi savo chemine sudėtimi ir fizikinėmis savybėmis: dalelių dydžiu, jų pasiskirstymu, paviršiaus plotu, kristališkumu, spalva – visa tai lemia skirtingą pucolanų aktyvumą (Kaminskas, Trakimavičiūtė, Kubiliūtė 2010).

Vertingi tyrimų rezultatai aprašyti darbe (Deltuva, Rudžionis 1997a). Čia nustatyta, kad į cementą pridedant iki 10 % inertinių mineralinių priedų, visais

atvejais padidėja cemento akmens tankis iki 4,5 %, o stipris – iki 40,2 %. Pridedant 10 % chemiškai aktyvių mineralinių priedų (ferosilicio atliekų), cemento akmens tankis padidėja iki 7,4 %, o stipris – iki 54,7 %. Įdėjus 15–20 % cemento su ferosilicio atliekomis, akmens stipris prilygsta cemento be priedų stipriui.

Aktyviųjų betono priedų teigiama įtaka yra žinoma. Priedai gali ne tik sujungti betone laisvasias kalkes, kurios susidaro cementui kietėjant, bet ir gerina betono savybes. Panašiai veikia ir Stonišio karbonatinė opoka, kurioje yra apie 40–50 % opalinės kilmės SiO_2 ir maždaug tiek pat smulkiadispersio CaCO_3 . Rekomenduojami ir SiO_2 mikrodulkių bei klinties priedai. Tačiau įvairių autorių duomenys apie šių priedų įtaką betono savybėms yra gana prieštaringi. Be to, kai kurie priedai gali mažinti betono atsparumą šalčiui (Vektaris, Vilkas 2006).

Aktyvieji dispersiniai priedai (dažniausiai pramonės atliekos, turinčios didelį kiekį amorfinio SiO_2) naudojami kaip dalinis cemento pakaitalas betono mišiniuose. Šie priedai dėl didelio dispersiškumo ir paviršinės energijos pertekliaus daro įtaką vandens ir kietosios fazės sąveikai betono mišinyje. Didindami mišinyje kietosios fazės paviršių, aktyvieji dispersiniai priedai didina vandens kiekio poreikį normalaus tirštumo cemento tešlai gauti (Sasnauskas, Skripkiūnas 2001).

1.3.2. Mineralinių priedų iš atliekų naudojimas

Kadangi pasaulio ekonomika auga ir technologijos žengia į priekį, pramonės atliekų tvarkymas, apdorojimas ir racionalus antrinis naudojimas yra sunkus uždavinys. Vienas iš galimų sprendimo būdų – jas panaudoti kaip priedus betono gamyboje. Ekonomiškai tai sumažins išlaidas ir suvartojamos energijos kiekį medžiagų gamyboje.

Norint efektyviai naudoti įvairias atliekas kaip priedus gaminant lengvuosius betonus, reikia visapusiškai jas ištirti, nustatyti jų mineralinę, cheminę, granulimetrinę sudėtį.

Rišamosios medžiagos sutaupomos, kai maišomas su to paties stambumo mikroužpildais, tuomet nepereikvojama rišamoji medžiaga ir užpildomos tarp gaminio užpildų esančios tuštumos, pagerėja tokio mišinio reologinės charakteristikos (Naujokaitis 2006).

Pastaraisiais metais gaminant statybines medžiagas gamintojams aktualu naudoti pigias žaliavas. Norėdami konkuruoti rinkoje gamintojai visomis išgalėmis stengiasi sumažinti gaminių savikainą, nes sumažėjus sąnaudoms jie savo produkciją klientams gali pasiūlyti žemesnėmis kainomis nei konkurentai. Gaminant produktus iš antrinių žaliavų susiduriama su keletu problemų, kurios didina tokio produkto savikainą. Gaminant produktus iš antrinių žaliavų būtina vadovautis analogiškais reikalavimais, keliamais produktams iš pirminių žaliavų. Be to, reikia papildomai laikytis specialių reikalavimų, susijusių su antrinių

žaliavų naudojimu. Dar viena problema – neigiamas produktų įvaizdis, kuris nepadidina šios produkcijos paklausos ir realizavimo (Uselytė, Silvestravičiūtė, Karaliūnaitė 2007). Tačiau vykdant atliekų perdirbimo ir naudojimo programas ateityje dalis gamtinių medžiagų turės būti pakeistos atliekomis. Dėl to kurįmanoma reikia naudoti atliekas vietoje gamtinių išteklių ir tai turi būti daroma.

Dirbtiniams užpildams gaminti naudojamos pramoninės atliekos. Organinės atliekos – tai dažniausia medienos pramonės atliekos ir žemės ūkio gamybos atliekos. Statybinėms medžiagoms gaminti naudojamos beveik visos akmens uolienos, daug organinių žaliavų ir pramonės gamybos atliekų (Naujokaitis 2006).

Betono mišiniams gaminti naudojama daug įvairių atliekų: susmulkinta padangų guma (Kerševičius, Skripkiūnas 2001), modifikuotos pjuvenos (Kantautas, Vaickelionis 2000), smulkintos keraminės plytos (Bektas, Wang, Ceylan 2009; Cachim 2009; Debieb, Kenai 2008), plastmasės atliekos (Ismail, AL-Hashmi 2008), smulkintas stiklas (Ismail, AL-Hashmi 2009), anglies kasyklų atliekos (Kinuthia, Snelson, Gailius 2009).

Petrella *et al.* (2007) tyrė betoną, kuriame užpildai buvo stiklo likučiai, žvirgždas ir keramzitas. Betono bandiniai pasiekė tokias mechanines savybes: 20 MPa ir 35 MPa gniuždymo stiprį (užpildais buvo 0,5/2 trupintas stiklas ir 2/16 frakcijos žvirgždas; 0,5/2 frakcijos keramzitas ir 2/16 frakcijos žvirgždas). Mažiausios gniuždymo stiprio vertės buvo gautos naudojus tik 2/16 mm trupintą stiklą ir keramzitą su stiklu.

Keramzitbetonio savybių gerinimo tyrimai daugiausia vykdomi Kinijos ir Rusijos mokslininkų. Mokslininkas Lu (2010) patente paskelbė tokią keramzitbetonio sudėtį vienam kubiniam metrui mišinio: 150–170 kg keramzito, 830–860 kg atliekų, 130–160 kg cemento, 10–20 kg lakiųjų pelenų ir 120–130 kg vandens. Gauto keramzitbetonio tankis – 1100 kg/m³. Taip pat toks keramzitbetonis pasižymi geromis garso izoliacinėmis ir gniuždymo stiprio savybėmis.

Savo darbe Sun, Gu, Sun (2009) pateikė keramzitbetonio su atliekomis mišinio sudėtį: 15–30 % cemento, 5–10 % lakiųjų pelenų, 5–20 % vandens, 10–45 % putokšlio ir 10–60 % keramzito. Tokio keramzitbetonio pranašumai – mažas svoris, gera garso sugertis ir ekologiškumas.

Patente (Krasnovskij, Khanina, Vikhrov 1991) nurodyta keramzitbetonio sudėtis yra tokia: cemento – 310 kg/m³, smėlio – 280 kg/m³, 10/20 frakcijos keramzito – 350 kg/m³, 5/10 frakcijos keramzito – 160 kg/m³, keramzito smėlio – 180 kg/m³, vandens – 240 l/m³; vandens cemento santykis – 0,77, aliuminio pudros 0,016–0,065 % nuo cemento masės bei natrio nitrito 0,04–0,19 % nuo cemento masės. Vidutinis tokių bandinių gniuždymo stipris yra 10,5 MPa, o tankis – 1223 kg/m³.

Patente (Korotina *et al.* 1990) mišinys susideda iš tokių komponentų: cemento – 13,0–15,5 %, keramzito žvirgždo – 48,0–52,5 %, kvarcinio smėlio –

13,0–17,0 %, cukraus gamybos atliekos – 4,0–8,5 %, vandens – likusi dalis. Rusijos autorių patente pateiktų sudėčių keramzitbetonio bandinių gniuždymo stipris – 12,3–14,8 MPa. Keramzito tankis – 600 kg/m³, kvarcinio smėlio tankis – 1350 kg/m³, smėlio stambumo modulis – 2,2–2,3 ir cukraus gamybos atliekos tankis 535 kg/m³. Bandinių vidutinis gniuždymo stipris – 11,42 MPa, tankis – 1098 kg/m³.

Mišinio sudėtis pateikta patente (Kochurov, Panov, Zekina 1991) gaminant lengvąjį betoną nurodyta tokia: portlandcemenčio – 20,1–22,0 %, keramzito smėlio – 18,2–25,6 %, keramzito žvirgždo – 30,1–47,9 %, pelenų – 8,0–9,1 %, paviršiaus aktyvinamųjų medžiagų – 1,8–2,2 %, sodos gamybos atliekų – 3,2–5,4 %, vandens – likusi dalis. Pagamintų bandinių vidutinis gniuždymo stipris po 28 parų kietėjimo – 8,0 MPa, vidutinis tankis – 1102 kg/m³.

Rusų mokslininkai patente (Virodov, Bratchikov, Zakharchenko 1986) aprašo, kad, norėdami padidinti bandinių stiprį, vietoj smulkiojo užpildo panaudojo ferosilicio gamybos atlieką. Mišinio sudėtis: cemento – 15–20 %, keramzito žvirgždo – 60–62 %, ferosilicio gamybos atliekos – 5–8 %, putų – 1,5–2,5 %, vandens – likusi dalis. Bandinių vidutinis gniuždymo stipris – 12,2 MPa, tankis – 1053 kg/m³.

Apibendrinant pateiktų patentų duomenis, galima daryti prielaidą, kad panaudojus keramzitbetonyje atliekas pagerėja keramzitbetonio fizikinės ir mechaninės savybės.

Mueller, Sokolova, Vereshagin (2008) savo darbuose lengviesiems betonams naudoja lengvuosius užpildus iš natūralių žaliavų – pemzą, perlitą, vermikulitą, keramzitą, skalūnus ir lengvus užpildus iš atliekų – stiklą, granules iš trupinto smėlio, gautas apdorojant pemzą.

Debieb, Kenai (2008) naudojo trupintas keramines plytas ir jomis pakeitė tiek smulkius, tiek stambius betono užpildus. Trupintomis keraminėmis plytomis buvo pakeista 25, 50, 75 ir 100 % betono užpildų. Tyrimų rezultatai parodė, kad jei naudojama 25–50 % trupintų keraminių plytų, gaunamas panašių savybių betono gaminytis kaip tas, kuriame nėra naudojama atliekinių priedų.

Pacheco-Torgal, Jalali (2010) išsamiai ištyrė susidarančias keramikos atliekas ir panaudojo jas betono gamyboje bei nustatė keramikos atliekų poveikį betono savybėms. Betono sudėtyje dalis tradicinio smėlio ir dalis tradicinio stambiojo užpildo buvo pakeista analogiško smulkumo keramikos atliekomis. Tokio betono gniuždymo stipris (gniuždymo stipris padidėjo apie 20 %) ir ilgamažiškumas buvo didesni.

Pasak Strazdo, Eidukevičiaus (1985) perspektyvi žaliava mineraliniam pluoštui gaminti yra cemento ir keramzito gamybos dulkės. Šios žaliavos nereikia nei džiovinti, nei smulkinti. Be to, cemento dulkės iš dalies dekarbonizuotos, jose nemažai šarminių oksidų, sulfidų, todėl lengvai išsilydomos.

Tačiau technogeninių atliekų naudojimo lygis iki šiol, ypač Lietuvoje, išlie-

ka labai mažas. Išnagrinėjus daugelį pasaulio mokslininkų darbų, nepavyko rasti publikacijų apie katalizatoriaus atliekų naudojimo galimybes keramzitbetonio gamyboje.

1.3.3. Plaušiniai priedai ir jų poveikis lengvojo betono savybėms

Plaušinės izoliacinės medžiagos ir gaminiai yra labai akytos struktūros, nes jų karkasą sudaro mineraliniu ir organiniu rišikliu sutvirtinti ir supinti įvairaus nevienodo ilgio bei orientacijos plaušai (Balandis *et al.* 1995).

Pasak Nagrockienės, Žurauskienės (2007), mineralinis pluoštas yra nevie-nalytis. Jame, be plaušelių, visuomet būna 2–40 % mažų 0,1–30 mm skersmens karoliukų. Mineralinio pluošto tankis yra 16–800 kg/m³, bandinių gniuždymo stipris 0,01–0,2 MPa, kuris priklauso nuo gniuždymo jėgos veikimo krypties.

Teigiama (Laukaitis 2000), kad sintetinių anglies plaušelių ilgį galima sus-kirstyti į tris grupės: ilguosius 1,5–2,6 mm, vidutinio ilgio 0,25–1,5 mm ir smulkius 38 μ – 0,25 mm. Suformuotame akytojo betono bandinyje plaušeliai pasiskirsto netolygiai. Viršutinėje dalyje 1 cm³ plote yra 355–368 plaušeliai, vidurinėje 365–418, apatinėje 413–426, t. y. plaušelių kiekis proporcingas ban-dinių tankiui. Pridėjus į dujų silikatbetonio mišinį anglies pluošto, reikia didinti V/K santykį. Tačiau formavimo mišinio takumas vis tiek mažėja proporcingai pluošto kiekiui. Į formavimo mišinį pridėjus šio pluošto daugiau nei 0,4 %, bandinių formuoti praktiškai negalima, nes formavimo mišinys netakus ir plau-šelių negalima tolygiai paskirstyti mišinyje. Anglies pluošto priedas labai padi-dina akytojo betono stiprumą. Nedidelis (0,05 %) šio pluošto kiekis padidina bandinių gniuždymo stiprį 13,6 %. Padidinus šio pluošto kiekį iki 0,2 % bandi-nių gniuždymo stipris padidėja 1,45 karto. Tai paaiškinama naujadarų išsidės-tymu pluošto یدubose ir tolygiu pluošto pasiskirstymu akytojo betono struktūroje.

Sinica (2001) tyrė poringąjį betoną, kuriame panaudojo sintetinį anglies pluoštą (plaušelių ilgis – 5,2 mm, skersmuo – 4,6–7,7 μm) bei stiklo pluoštą, kurio plaušelių ilgis – 5 mm. Jis nustatė, kad neautoklavinio putų cementbetono cementuojančios medžiagos sukibimo jėga su anglies plaušo plaušeliais yra mažesnė už plaušelių nutraukimo jėgą. Tempiant arba lenkiant putų cementbe-tonį plaušeliai iš jo išsitraukia, nes armavimo medžiagos pluoštas yra stipresnis už sukibimo jėgą tarp pluošto ir cementbetonio. Pluoštiniai armavimo tarpai kompozito gniuždomąjį stiprį keičia nedaug. Sintetinio anglies pluošto 0,4 % priedas kompozito lenkiamąjį stiprį padidina 50 %, o pridėjus 0,4 % stiklo pluošto – 70 %, palyginti su kontrolinio bandinio lenkiamuoju stipriu.

Tyrėjas Mikulskis (2007) tyrė pluoštinių priedų poveikį autoklavinio akyto-jo betono savybėms. Panaudojus 5 mm pluoštinius armavimo priedus: anglies,

kurios skersmuo – 6,15 μm , polipropeno – skersmuo 7,5 μm , bazaltinės vatos – skersmuo 4,6 μm , kaolino vatos – skersmuo 3,3 μm , buvo nustatyta, kad mineraliniai pluoštai (bazaltinis ir kaolino) chemiškai reaguoja ir su rišamąja medžiaga, todėl sukimba labai gerai. Hidrofilizuoto anglies pluošto 0,3 % kiekis 45,5 % padidina gniuždomąjį stiprį, o 0,2 % kiekis – 135,6 % lenkiamąjį stiprį.

Norint pagerinti mechanines pluošto savybes, reikia gerinti mineralinių plaušelių kokybę: didinti pluošto stiprumą, tamprumą, mažinti plaušelių storį bei karoliukų kiekį, suvilgyti plaušelius tokiu rišikliu, kuris tolygiai ir smulkiais lašeliais pasiskirstytų dirbinyje (Strazdas, Eidukevičius 1985).

Literatūroje nepavyko rasti publikacijų apie mulitinės vatos atliekų naudojimą keramzitbetonio gamyboje.

1.4. Poringoji keramzitbetonio struktūra ir jo atsparumas šalčiui

Vienpusio šaldymo principu pagrįstais metodais gana tiksliai galima nustatyti poringųjų statybinių medžiagų eksploatacinį atsparumą šalčiui.

Mokslininkai atliko įvairios paskirties betonų bandinių lyginamuosius atsparumo šalčiui tyrimus, taikant klasikinį turinio ir eksploatacijos sąlygas atitinkantį vienpusio šaldymo būdus (Mačiulaitis, Žemaitytė 1998a, 1998b, 1998c, 1999; Mačiulaitis, Nagrockienė 2001, 2002; Mačiulaitis, Žvironaitė, Žemaitytė 1997; Nagrockienė 2001; Мачюлайтис 1997).

Bet įvairių medžiagų tyrimai tiesioginiais šaldymo metodais užtrunka nuo kelių mėnesių net iki metų. Todėl vis svarbesnę reikšmę įgyja spartieji prognozavimo metodai, kurių rezultatai leidžia prognozuoti atsparumą šalčiui eksploatacijos sąlygomis pagal mechaninius, struktūrinius ir fizikinius rodiklius. Poringųjų sieninių gaminių atsparumas šalčiui yra ne tik svarbi, bet ir labai sudėtinga jų savybė, priklausanti nuo atmosferinių ir eksploatacinių veiksnių ir sąlygų poveikio ir nuo pačių medžiagų mechaninių bei fizikinių ir cheminių savybių (Мачюлайтис 1997). Keraminių medžiagų eksploatacinio atsparumo šalčiui spartaus prognozavimo metodų vystymui skiriama daug dėmesio (Kičaitė 1999; Kičaitė, Mačiulaitis 2001, 2002; Mačiulaitis, Kičaitė 2002), o betonams tokių metodų sukurta labai mažai (Mačiulaitis, Žemaitytė 1998). Tačiau sieninių ir apdailos gaminių pastatų konstrukcijose klimatinės eksploatacijos Lietuvoje yra tapachios.

Betonuose, kurie pagaminti iš poringųjų užpildų, vanduo pasiskirsto ir cemento akmenyje, ir užpilde. Kai betonas pakaitomis šaldomas ir atšildomas, irimas gali vykti per cemento akmenį ir per užpildą. Šaldomas ir atšildomas keramzitbetonis gali gerai priešintis irimui tik dėl to, kad keramzito grūdelių paviršius yra grublėtas, gerai sukimba su cemento akmeniu. Taigi keramzitbe-

tonis gali atlaikyti ne mažiau šaldymo ir šildymo ciklų negu betonai, pagaminti iš tankių ir stiprių užpildų. Atlikti keramzitbetonio atsparumo šalčiui tyrimai parodė, kad jis gali atlaikyti 100 ir daugiau šaldymo ir atšildymo ciklų (АСиА НИИЖБ 1963).

Kaip teigė Šeininas ir kt. (Шейнин, Эккель, Феднер 2008), daugkartinis ciklinis šaldymas ir šildymas leidžia nustatyti betono savybių pasikeitimo kinetiką. Toks tyrimas leidžia nustatyti ne tik ciklų skaičių, kurį gali atlaikyti betonas, faktiškai neprarasdamas savybių, bet ir nustatyti betono atsparumo šalčiui markę.

Betono mišinio gaminimo procese naudojama 50–60 % perteklinio vandens. Kietėjant betonui dalis šio vandens iš jo pasišalina, palikdamas poras ir kapiliarus, kurie sumažina medžiagos kokybę. Keramzitbetonio mišinys yra nevientisa plastiškoji masė, nes pats keramzitas turi porų ir kapiliarų. Sistemoje esantis vanduo susilaiko jėga, kurios vertė priklauso nuo porų ir kapiliarų skersmens. Be to, poros ir kapiliarai formuojasi ir pačiame kietėjančiame keramzitbetonyje dėl netankaus kietųjų dalelių pasiskirstymo mišinyje (Копылов 2000).

1.2 pav. Poringumo modelis su grūdėta struktūra: a – rutulio formos grūdeliai;

b – netaisyklingos formos grūdeliai (Туркестанов 1964)

Fig. 1.2. Porosity model with the grained structure: a – grains with spherical shape;

b – grains with irregular shape (Туркестанов 1964)

Cemento akmens kapiliarai gali susiformuoti tarp smulkiausių cemento grūdelių. Hidrolizės, koloidizacijos, kristalizacijos ir perkristalizacijos procesų metu gali iš dalies pasikeisti grūdelių forma ir tarp šių grūdelių atsirasti plyšiai. Tarpgrūdeliniai plyšiai apibūdinami kaip cemento akmens kapiliarinės ertmės. Kapiliarinės ertmės tarp grūdelių panašios į išlenktus trikampius, kurie suspausti ir ištempti (1.2 pav., b). Šiame skerspjūvyje susivienija įvairių dydžių kapiliarai (Туркестанов 1964).

Išgarinamas vanduo, nesurištas cemento kietėjimo procese, betone sudaro dvi porų grupes, kurios skiriasi dydžiais: mažų matmenų kapiliarinės poros ir gelio poros (nuo $15 \cdot 10^{-8}$ iki $40 \cdot 10^{-8}$ cm). Kapiliarinės poros, esančios tarp gelio dalelių, yra tūkstančius kartų didesnės už gelio poras (Горчаков 1964).

Kai kurie mokslininkai (Косухин, Шаповалов 2006) teigia, kad betonas bus atsparus šalčiui, jei jame dominuos smulki kristalinė struktūra, o klinkerinių fazių sąveika su vandeniu vyktų greičiau ir tuo metu porų erdvėje turėtų susiformuoti kuo daugiau sąlygiškai uždarytų smulkių sferinių porų. Pageidautina, kad jos tolygiai pasiskirstytų visa apimtimi ir susidarytų kuo mažiau atvirų kapiliarinių porų. Atsižvelgiant į keramzitbetonio porų erdvės, skiedinio dalies struktūrą ir jo poveikį stipriui ir atsparumui šalčiui, daugiafunkcio modifikatoriaus priedas turėtų keisti porų pasiskirstymo pobūdį. Tada sąlygiškai padidėja uždarytų smulkių sferinių porų tūris, tuo metu atviro kapiliarinio poringumo tūris mažėja. Šis priedas leidžia labai sumažinti (iki 20 %) suvartojamo betono mišinio vandens kiekį išlaikant jo slankumą. Be viso to, keramzitbetonio skiedinio dalies smulkiakristalė struktūra pasiekama dėl peptizacijos efekto, kuris užima ir mažesnę atviro kapiliarinio poringumo tūrį. Tai didina betono stiprį. Priedas leidžia gauti betoną, kurio atsparumas šalčiui – 800–1000 ciklų, o tai padidina ir jo ilgaamžiškumą.

Įvairios struktūros termoizoliacinis keramzitbetonis naudojamas ir kaip termoizoliacinė medžiaga sluoksniuotosiose ativarinėse pastatų konstrukcijose. Jo tankis – nuo 350 iki 600 kg/m³, gniuždymo stipris – nuo 0,5 iki 2,5 MPa, šilumos laidumo koeficientas – 0,11–0,17 W/mK. Konstrukcinis termoizoliacinis keramzitbetonis naudojamas viensluoksnėms sieninėms plokštėms. Jo tankis – nuo 700 iki 1200 kg/m³, gniuždymo stipris – nuo 3,5 iki 10 MPa, šilumos laidumo koeficientas – 0,21–0,46 W/mK, atsparumas šalčiui – nuo 15 iki 100 ciklų (šaldant ir atšildant). Konstrukcinis keramzitbetonis skirtas laikančiosioms pastatų konstrukcijoms, jo tankis – 1400–1800 kg/m³, gniuždymo stipris – 10–50 MPa, atsparumas šalčiui – iki 500 ciklų (Хигерович 1970).

Konstrukcinis keramzitbetonis yra atsparus šalčiui. Atliekami atsparumo šalčiui tyrimai periodiškai bandinius užšaldant –20 °C temperatūroje ir jūros vandenyje, ir paprastame vandenyje. Net po 300–500 ciklų bandiniai iš lengvojo aukštos markės keramzitbetonio išsaugojo savo pradinį vaizdą (be įtrūkių), stipris sumažėjo tik 15 % (Бужевич 1970).

Maskvos betono ir gelžbetonio mokslinių tyrimų institute buvo ištirtas konstrukcinis termoizoliacinis M300-350 markės keramzitbetonis. Po 600 šaldymo ir šildymo ciklų tokio betono stipris išaugo. Įdedant į keramzitbetonio mišinį specialių priedų galima padidinti keramzitbetonio atsparumą šalčiui 2–3 kartus (Горин, Токарева, Кабанова 2010).

Mokslininkų (Szwabowski, Lazniewska-Piekarczyk 2009) savaime susitankinančio betono bandymo rezultatai parodė, kad panaudojus orą įtraukiančius priedus atsparumas šalčiui siekia 300 ciklų.

Janavičius, Skripkiūnas, Daukšys (2008) nustatė, kad lengvojo betono su keramzito užpildu bandiniai atlaiko 150 užšaldymo ir atšildymo ciklų. Lengvojo betono gniuždymo stiprio vertė po 150 užšaldymo ir atšildymo ciklų padidėjo 4,2 MPa, o tai sudaro 13,5 %, lyginant su kontrolinių bandinių stipriu.

Lo *et al.* (2008) tyrė lengvųjų užpildų vandens įverties poveikį porų dydžio pasiskirstymui betono sąlyčio paviršių zonoje. Tyrimams naudojo keramzitą, kurio tankis – 830, 440 ir 620 kg/m³, vandens įmirkis – 8,9 %, 9,6 % ir 11 %, atitinkamai. Paruoštų trijų mišinių vandens ir cemento santykis – 0,4, 0,44 ir 0,48. Akučių plotas procentais ir porų dydžio pasiskirstymas cemento tešloje betono sąlyčio paviršiaus zonoje po 28 parų buvo gauti naudojant aukštos rezoliucijos optinį mikroskopą su programine vaizdų analizės įranga. Rezultatai parodė, kad porų plotas svyravo tarp 14,4 % ir 21,7 %.

Atsparaus šalčiui keramzitbetonio gavimo būdas paskelbtas patente (Lesovik *et al.* 2010). Paskelbtame techniniame sprendime į betono mišinį įdedamas cheminis priedas: citrinos rūgšties gamybos atlieka ir potašas. Betono mišinyje naudotas begipsis portlandcementis, kvarcinis smėlis ir keramzito žvirgždas. Gauto mišinio išskirtinumas yra aukštos eksploatacinės ir funkcinės betono savybės. Jame nurodytoji formavimo mišinio sudėtis yra tokia: begipsio portlandcemenčio – 380 kg/m³, smulkios frakcijos keramzito – 250 kg/m³, stambios frakcijos keramzito – 150 kg/m³, smėlio – 300 kg/m³, citrinos rūgšties gamybos atliekos – 2–4 kg/m³, potašo – 24–36 kg/m³, vandens – 220 l/m³.

1.5. Analitinės mokslo darbų apžvalgos apibendrinimas ir disertacijos uždavinių formulavimas

Literatūros analizė rodo, kad vietoj dalies cemento panaudojus aktyvius mineralinius priedus, leidžia sumažinti cemento kiekį bei keramzitbetonio kainą.

Apžvelgta keramzitbetonio gamybos raida, mineralinių bei aktyviųjų mineralinių priedų rūšys, jų poveikis lengvųjų betonų savybėms, bei mineralinių priedų iš atliekų naudojimas. Išnagrinėti plaušiniai priedai ir keramzitbetonio atsparumas šalčiui.

Duomenų apie katalizatoriaus atliekas iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus ir nedegtos mulitinės vatos naudojimą keramzitbetonyje nerasta. Šie priedai naudojami keramikoje, ugniai atspariuose betonuose ir kt.

Apibendrinus literatūros apžvalgą suformuluoti tokie darbo uždaviniai:

1. Nustatyti aktyviųjų mineralinių priedų savybes.
2. Nustatyti ir pagrįsti, kaip aktyvieji mineraliniai priedai ir ypač jų kiekis veikia sukietėjusio keramzitbetonio savybes.
3. Nustatyti aktyviųjų mineralinių priedų poveikį portlandcemenčio hidratacijai, susidariusiems hidratacijos produktams ir skiedinio dalies mikrostruktūrai.
4. Nustatyti aktyviųjų mineralinių priedų poveikį keramzitbetonio ilgaamžiškumui, t. y. atsparumui šalčiui.
5. Nustatyti geriausią aktyviųjų mineralinių priedų kiekį keramzitbetonio mišiniuose.

Naudotos žaliavos ir tyrimų metodika

Šiame skyriuje apžvelgiamas keramzitbetonio bandinių paruošimas, pristatomi jų tyrimo metodai, laboratorinė įranga, nustatytos naudojamų žaliavų savybės.

2.1. Tyrimų metodika

2.1.1. Tyrimo įranga ir metodai

Fizikinėms ir mechaninėms keramzitbetonio savybėms nustatyti buvo formuojami bandiniai – 100×100×100 mm kubai. Bandiniai buvo pagaminti ir sukietinti pagal LST EN 12390-2 (2009) standartą. Keramzitbetonio mišinių slankumas buvo nustatomas pagal LST EN 12350-2 (2009) standartą su tuščiaviduriu nupjautiniu kūgiu.

Suformuoti bandiniai buvo džiovinami elektrinėje džiovykloje SNOL. Keramzitbetonio bandinių tankis buvo nustatomas pagal LST EN 12390-7 (2009) standartą. Bandyta po penkis 100×100×100 mm dydžio bandinius. Bandinių gniuždymo stipris buvo nustatomas pagal LST EN 12390-3 (2009) standartą.

Gniuždymo bandymams atlikti buvo naudotas kompiuterizuotas gniuždymo P125/NS-PA3-DIG 2000 presas.

Cemento, katalizatoriaus atliekos ir nedegtos mulitinės vatos, keramzito smėlio ir paruoštų bandinių mikrostruktūra buvo ištirta skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu (SEM EVO LS 25, Zeiss Germany). Mulitinės vatos paviršiaus analizei atlikti buvo naudotas optinis mikroskopas МИН-10. Žaliavų cheminė (elementinė) sudėtis buvo nustatyta analizatoriumi OXFORD Instruments INCA Penta FET×3.

Smėlio granulimetrinė sudėtis buvo nustatyta pagal LST EN 933-1 (2002) standartą. Katalizatoriaus ir cemento dalelių dydis buvo nustatytas prietaisu CILAS 1090 DRY. Bandinių įmirkis buvo nustatytas pagal LST 1428.18 (1997) standarto metodiką. Keramzitbetonio mišinio sudėtis buvo apskaičiuota pagal metodiką, aprašytą literatūroje (Баженев 1975).

Keramzitbetonio bandinių šilumos laidumo koeficientas buvo nustatytas naudojant FOX300 kompiuterizuotą įrenginį pagal LST EN 1745 (2002) standartą. Bandyta po tris 30×30×5 cm dydžio bandinius.

Rentgenodifrakcinė analizė buvo atlikta difraktometru DRON-7. Rentgenogramos buvo šifruojamos pagal literatūroje pateiktas etalonines lenteles, kuriose įvertinamos atstumo d tarp plokštumų ir santykinio intensyvumo I vertės (Васильев, Нахмансон 1986; Ковба, Трунов 1976; Пушаровский 2000; Михеев 1957; ASTM 1967). Gautieji rentgenografinės analizės duomenys buvo apdoroti kompiuterine programa „MS Excel“.

Temperatūros kitimai betonui rišantis ir kietėjant buvo nustatyti pagal „Alcoa“ firmos sukurtą metodiką (Calcium aluminate cements 1999). Vandens su skirtingais atliekų kiekiais suspensijos pH vertės buvo nustatytas „Mettler Toledo“ firmos EL 20/EL 2 prietaisu. Matavimai buvo atlikti 20°C temperatūroje.

Atliekų piltinis tankis, savitasis tankis ir aktyviojo SiO₂ kiekis buvo nustatytas pagal LST 1577.1 (1999) standartą. Keramzito grūdelių, trupinamų sauso būvio, atsparumas, žaliavų piltinis tankis, dalelių tankis ir tuštymėtumas buvo nustatyti pagal LST EN 13055-1 (2003) standartą.

Keramzito smėlio bendrasis atviras poringumas, sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storio rodiklis, efektyvus poringumas, poringos erdvės rezervas ir imirkis po 72 val. buvo nustatyti pagal literatūroje aprašytą metodiką (Mačiulaitis 1996; Mačiulaitis, Malaiškienė, Kičaitė 2008).

Pagal literatūroje aprašytą metodiką (Mačiulaitis 1996; Mačiulaitis, Malaiškienė, Kičaitė 2008) buvo nustatyti ir apskaičiuoti keramzitbetonio bandinių struktūriniai rodikliai, t. y. struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis N , kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis šaldymo kryptimi g_2 , efektyvus poringumas W_E , bendrasis atviras poringumas W_R ir poringos erdvės rezervas R , kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptimi G_1 , kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi G_2 .

Nagrinėtų keramzitbetonio fizikinių ir mechaninių bei struktūrinių rodiklių skaičiavimo metodika pateikta 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Fizikinių ir mechaninių bei struktūrinių rodiklių skaičiavimo metodika
Table 2.1. Methodology for the calculation of physical and mechanical, as well as structural parameters

Parametras ir dimensija	Skaičiavimo formulės	Pagrindinio parametro sandų aprašymas ir dimensijos
Poringos erdvės rezervas $R, \%$	$R = (1 - W_E/W_R) \cdot 100$	W_E – efektyvusis poringumas pagal vandens įgertį po 72 val., % W_R – bendrasis atviras poringumas pagal vandens įgertį vakuumuojant (specialiu režimu), %
Struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis N, mm	$N = (H_{\max} - H_{\min})/H_{\min}$	$H_{\max}, H_{\min}$ – kapiliarinio drėkinimo fronto greičiai (po 3–5 min.), mm
Efektyvus poringumas $W_E, \%$	$W_E = (m_1 - m)/m \cdot \rho \cdot 100$	m_1 – bandinio, išotinto kapiliarinio siurbimo būdu, masė, g m – bandinio, išdžiovinto iki pastovios masės, masė, g ρ – bandinio tankis, g/cm ³
Kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis šaldymo kryptimi $g_2, \text{g/cm}^2$	$g_2 = (m_1 - m)/S$	m_1 – bandinio, išotinto kapiliarinio siurbimo būdu, masė normaliomis sąlygomis šaldymo kryptimi, po 30 min., g m – bandinio, išdžiovinto iki pastovios masės, masė, g S – bandinio darbinio paviršiaus plotas, cm ²
Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptimi $G_1, \text{g/cm}^2$	$G_1 = (m_3 - m)/S$	m_3 – bandinio, vakuume išotinto kapiliarinio siurbimo būdu, masė, kai sotinama per tą plokštumą, kuri eksploatuojant būtų statmena šaldomai plokštumai, po 10 min., g m – bandinio, išdžiovinto iki pastovios masės, masė, g S – bandinio darbinio paviršiaus plotas, cm ²

2.1 lentelės pabaiga

Parametras ir dimensija	Skaičiavimo formulės	Pagrindinio parametro sandų aprašymas ir dimensijos
Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi, G_2 , g/cm ²	$G_2 = (m_4 - m)/S$	m_4 – bandinio, vakuume išotinto kapiliarinio siurbimo būdu, masė, kai sotiinama per tą plokštumą, kuri eksploatuojant būtų šaldoma, po 10 min., g m – išdžiovinto iki pastovios masės bandinio masė, g S – bandinio darbinio paviršiaus plotas, cm ²
Bendrasis atviras poringumas W_R , %	$W_R = (m_2 - m)/m \cdot \rho \cdot 100$	m_2 – bandinio, įmirkyto vakuume, masė ore, g m – bandinio, išdžiovinto iki pastovios masės, masė, g ρ – bandinio tankis, kg/m ³
Tankis ρ , kg/m ³	$\rho = m/V$	m – bandinio, išdžiovinto iki pastovios masės, masė, kg V – bandinio tūris, m ³
Gniuždymo stipris R , MPa	$R = F/S$	F – maksimali apkrova, nustatyta bandymo metu, N S – bandinio gniuždymo plotas, mm ²
Vandens įmirkis W , %	$W = (m_1 - m)/m \cdot 100$	m – išdžiovinto iki pastovios masės bandinio masė, g m_1 – įmirkyto bandinio masė, g

Pagal bandinių efektyvaus poringumo W_E reikšmę parenkama eksploatacinio atsparumo šalčiui sąlyginiais ciklais prognozavimo lygtis (Mačiulaitis 1996, 1997).

Jei $W_E \leq 26$ %, tai bandinių suirimo pradžia F_{RE1} buvo apskaičiuota pagal tokią formulę:

$$F_{RIE} = 0,231 \frac{R^{1,068} \cdot D^{1,345} \cdot G_1^{0,275} \cdot G_2^{0,663}}{N^{0,285} \cdot g_2^{0,830}} \text{ sąlyginiais ciklais,} \quad (2.1)$$

o bandinių suirimo pabaiga F_{RE2} buvo apskaičiuota pagal šią formulę:

$$F_{R2E} = 0,223 \frac{R^{1,456} \cdot D^{0,759} \cdot G_1^{0,384} \cdot G_2^{0,852}}{N^{0,168} \cdot g_2^{1,034}}, \text{ sąlyginiais ciklais.} \quad (2.2)$$

Jei $W_E \geq 26 \%$, tai bandinių suirimo pradžia F_{RE3} buvo apskaičiuota pagal formulę:

$$F_{R1E} = 0,051 \frac{R^{1,642} \cdot D^{2,332} \cdot G_1^{0,695} \cdot G_2^{0,779}}{N^{0,334} \cdot G_2^{1,145}}, \text{ sąlyginiais ciklais,} \quad (2.3)$$

o bandinių suirimo pabaiga F_{RE4} buvo apskaičiuota pagal formulę:

$$F_{R2E} = 0,063 \frac{R^{1,813} \cdot D^{2,135} \cdot G_1^{0,178} \cdot g_2^{1,335}}{N^{0,395} \cdot G_2^{0,517}}, \text{ sąlyginiais ciklais.} \quad (2.4)$$

Nustatant mišinio komponentų vandens poreikavimą iš pradžių buvo apskaičiuota tiriamojo bandinio masė $m_{\text{apsk.}}$ pagal kontrolinio ir bandomo bandinių tūrio santykį, padaugintą iš tiriamojo bandinio, išlaikyto vandenyje, masės, pagal tokią formulę:

$$m_{\text{apsk.}} = \frac{V_k \cdot m_t}{V_t}, \text{ g} \quad (2.5)$$

čia V_k – kontrolinio bandinio tūris, cm^3 ; V_t – tiriamojo bandinio tūris, cm^3 ; m_t – tiriamojo bandinio, išlaikyto vandenyje, masė atitinkamą laiką (2, 14, 28 paras) prieš nustatant stiprį.

Vandens poreikis m , išreikštas procentais, tarp kontrolinių bandinių masės ir tiriamųjų bandinių masės skirtumo, lyginant su kontrolinio bandinio mase, apskaičiuotas pagal tokią formulę:

$$m = \frac{(m_k - m_{\text{apsk.}}) \cdot 100}{m_k}, \% \quad (2.6)$$

čia m_k – kontrolinio bandinio, išlaikyto vandenyje, masė atitinkamą laiką (2, 14, 28 paras) prieš nustatant stiprį, g; $m_{\text{apsk.}}$ – apskaičiuota masė, g.

Vandens poreikis gali būti neigiamas, lygus nuliui ir teigiamas. Kai keramzitbetonio bandinių su atliekų priedais, lyginant su kontroliniais bandiniais, vandens poreikis yra neigiamas, tai tiriamuose bandiniuose vandens nepakanka. Kai jis lygus nuliui, vandens pakanka. Kai keramzitbetonio bandinių su atliekų priedais, lyginant su kontroliniais bandiniais, vandens poreikis yra teigiamas, tai tiriamuosiuose bandiniuose esti vandens perteklius.

Regresinei analizei atlikti duomenys buvo grupuojami ir paruošiami programa „MS Excel“, o duomenų regresinė analizė buvo atlikta naudojantis „Statistica“ programiniu paketu. Buvo tikrinami įvairūs matematiniai modeliai: tiesinis ($y = b_0 + b \cdot x$), kvadratinis ($y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$) laipsninis ($y = b_0 \cdot x^b$), eksponentinis ($y = b_0 \cdot e^{bx}$), logaritminis ($y = b_0 + b \cdot \log_{10}(x)$). Priklausomybei išreikšti buvo pasirenkama tokia funkcija, kuri tiksliausiai apibūdins duomenų pasiskirstymo pobūdį. Buvo apskaičiuoti regresinio modelio kokybės rodikliai: koreliacijos R ir determinacijos R^2 . Šie koeficientai turi būti artimiausi vienetui (Sakalauskas 2003).

Regresinė analizė taikoma, jeigu $R^2 \geq 0,25$, o jeigu $R^2 < 0,25$, labai abejotina, ar tiesinės regresijos modelis tinka (Čekanavičius, Murauskas 2002; Martinėnas 2004). Priklausomybės tarp tiriamųjų veiksnių ryšio stiprumas buvo vertinamas pagal koreliacijos koeficiento (R) skaitinius dydžius ir apskaičiuojamas pagal metodiką (Liukaitis, Kleveckas 2006).

Jeigu R koeficiento reikšmė yra tarp 0,90 ir 1, tai tarp tiriamųjų dydžių yra labai stiprus tarpusavio ryšys, kai $0,7 < R < 0,89$ – stiprus ryšys. Kai dydis yra tarp 0,69 ir 0,4, jis yra vidutinio stiprumo, o kai mažiau nei 0,4 – priklausomybė tarp dydžių silpna (Kasiulevičius, Denapienė 2008).

Vidutinis standartinis nuokrypis (s_e) išreiškiamas kvadratine šaknimi iš normuotos klaidų nuokrypio kvadratų sumos. Kuo apskaičiuotieji s_e dydžiai mažesni, tuo mažesnis nuokrypis nuo regresinės kreivės (Sakalauskas 2003).

2.1.2. Bandinių paruošimas

Mišiniuose su katalizatoriaus atlieka iš katalitinio naftos krekingo reaktoriaus (KAT) cemento kiekis buvo keičiamas iki 30 %, o mišiniuose su mulitinės vatos (MV) priedu iki 20 % kas 5 %. Visi keramzitbartonio bandiniai buvo formuojami iš tokių žaliavų: CEM II/A-L 42,5 N klinties portlandcemenčio, 2/4 frakcijos *Maxit* keramzito smėlio, 0/4 frakcijos natūralaus smėlio ir aktyviųjų mineralinių priedų.

Ruošiant keramzitbartonio mišinius su KAT priedu, rišamoji medžiaga ir užpildai buvo dozuojami pagal masę, o vanduo ir priedas – pagal tūrį. Aktyvusis mineralinis priedas buvo sumaišomas su cementu, keramzito smėliu, smėliu, o tik vėliau visas mišinys buvo užmaišomas vandeniu. Pirminiai bandymai parodė, kad sausi mulitinės vatos plaušeliai blogai išsimašo. Geriausi rezultatai pasiekti MV priedą sumaišius su puse reikiamo kiekio vandens. Tuomet sumaišius kitus sausus užpildus ir rišamąją medžiagą buvo įvedamas sudrėkintas MV priedas ir tik tada supilamas likęs vandens kiekis ir visa masė homogenizuojama.

Visi betono mišiniai buvo maišomi rankiniu būdu. Maišymo trukmė – apie 5 min. Visų betono mišinių slankumas buvo S1 klasės. Patikrinus ir pakorega-

vus betono mišinio slankumą pagal pradines sąlygas buvo formuojami $10 \times 10 \times 10$ cm kubai fizikinėms ir mechaninėms betono savybėms nustatyti. Bandiniai buvo tankinami vibruojant ant laboratorinės vibracinės aikštelės 30 s. Suformuoti bandiniai buvo laikomi vieną parą uždengtose formose, paskui išformuojami ir kietinami pagal LST EN 12390-2 (2009) standartą. Kietinti 28 paras standartinėmis sąlygomis bandiniai išimami iš kietinimo kameros ir prieš bandant išlaikomi 2–3 val. kambario sąlygomis.

Mišinių egzoterminiams tyrimams bandiniai buvo ruošiami taip: 1000 g sveriantys keramzitbetonio mišiniai buvo formuojami išardomose $100 \times 100 \times 100$ mm dydžio formose. Formavimo metu į bandinį buvo įstatoma termopora, patalpinta stikliniame vamzdyje. Vibravimo būdu suformuotas mišinys tuojau pat kartu su forma buvo talpinamas į metalinę dėžę su vidine 50 mm storio polistireninio putplasčio izoliacija. Vienu metu buvo suformuojamos keturios keramzitbetonio mišinių kompozicijos su skirtingu atliekų kiekiu. Temperatūra matuojama ir jos dydžiai nepertraukiamai fiksuojami tol, kol trunka šilumos išsiskyrimo procesai bandinyje. Egzoterminiai tyrimai buvo atlikti kambario temperatūros sąlygomis (20 ± 1) °C, naudojamų žaliavų ir vandens temperatūra (20 ± 1) °C.

Keramzitbetonio bandinių šilumos laidumo koeficientui nustatyti, esant vidutinei 10 °C temperatūrai, buvo formuojami $30 \times 30 \times 5$ cm bandiniai. Betono mišiniai buvo maišomi laboratorijoje rankiniu būdu. Keramzitbetonio mišiniai buvo sudėti į medines formas ir taip laikomi vieną parą, o kitą dieną išformuojami. Bandiniai buvo kietinami pagal LST EN 12390-2 (2009) standartą. Po kietinimo 28 paras standartinėmis sąlygomis visi suformuoti bandiniai buvo džiovinami elektrinėje džiovykloje SNOL 24 valandas (105 ± 5) °C temperatūroje.

2.1.3. Betono mišinių sudėtys

Aktyvieji mineraliniai priedai KAT ir MV pakeičia mišiniuose atitinkamą cemento kiekį. Keramzitbetonio bandinių formavimo mišinių sudėtys, naudojant KAT atlieką, pateiktos 2.2 lentelėje. Su MV atlieka keramzitbetonio bandinių formavimo mišinių sudėtys pateiktos 2.3 lentelėje. Iš pateiktų lentelių matyti, kad betono mišiniuose keičiasi naudojamų priedų ir rišamosios medžiagos kiekiai. Visų tiriamųjų mišinių su KAT priedu vandens ir kietųjų medžiagų santykis (V/K) siekia 0,16, o mišinių su MV priedu V/K – siekia 0,13.

Iš 2.2 lentelės matyti, kad keramzito smėlio, natūralaus smėlio ir vandens kiekiai yra panašūs. Cemento kiekis mišiniuose svyruoja nuo 314 iki 427 kg/m^3 , o KAT kiekis – nuo 12 iki 135 kg/m^3 .

2.2 lentelė. Keramzitbetonio mišinių su KAT sudėtys**Table 2.2.** Compositions of expanded-clay lightweight concrete mixtures with CAT

Mišinio žymuo	Medžiagų kiekiai 1 m ³ betono mišinio, kg						
	katalizatoriaus kiekis, %	cementas	keramzito smėlis 2/4	smėlis 0/4	vanduo	katalizatorius	V/C
K0	0	427	312	648	221	—	0,52
K1	3	413	311	644	220	12	0,53
K2	5	410	315	653	223	21	0,54
K3	10	380	309	640	219	42	0,57
K4	15	379	325	675	230	66	0,61
K5	20	342	312	646	221	84	0,65
K6	30	314	328	681	232	135	0,74

Iš 2.3 lentelės matyti, kad keramzito smėlio kiekis kito nuo 272 iki 353 kg/m³, natūralaus smėlio – nuo 565 iki 731 kg/m³, o vandens kiekis mišiniuose yra panašus. Cemento kiekis mišiniuose kito nuo 229 iki 371 kg/m³, o MV kiekis – nuo 17 iki 57 kg/m³.

2.3 lentelė. Keramzitbetonio mišinių su MV sudėtys**Table 2.3.** Compositions of expanded-clay lightweight concrete mixtures with MW

Mišinio žymuo	Medžiagų kiekiai 1 m ³ betono mišinio, kg						
	mulitinės vatos kiekis, %	cementas	keramzito smėlis 2/4	smėlis 0/4	vanduo	mulitinė vata	V/C
MV0	0	371	353	731	192	—	0,52
MV1	5	327	327	678	178	17	0,54
MV2	10	323	341	707	186	36	0,57
MV3	15	257	288	597	156	45	0,61
MV4	20	229	272	565	148	57	0,65

2.4 lentelė. Keramzitbetonio mišinių su KAT ir MV atliekomis slankumo vertės**Table 2.4.** Slumping factors of the expanded-clay lightweight concrete mixtures with CAT and MW waste

Mišinio žymuo	Mišinio slankumas, mm	Mišinio žymuo	Mišinio slankumas, mm
K0	40	MV0	40
K1	40	—	—
K2	40	MV1	40

2.4 lentelės pabaiga

Mišinio žymuo	Mišinio slankumas, mm	Mišinio žymuo	Mišinio slankumas, mm
K3	30	MV2	30
K4	20	MV3	20
K5	10	MV4	10
K6	10	—	—

Buvo nustatytas visų tiriamųjų mišinių, pateiktų 2.4 lentelėje, slankumas. Iš 2.4 lentelės duomenų išeina, kad visi tiriamieji betono mišiniai priklauso S1 slankumo klasei (slankumas nuo 10 iki 40 mm).

2.2. Naudotų žaliavų charakteristikos ir savybės

2.2.1. Portlandcementis

Kaip rišamoji medžiaga tyrimams buvo naudotas AB „Akmenės cementas“ klinties portlandcementis CEM II/A-LL 42,5 N, atitinkantis LST EN 197-1 (2000) standarto reikalavimus. Portlandcemenčio cheminė ir mineralinė sudėtis, nustatyta AB „Akmenės cementas“, pateikta 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Klinties portlandcemenčio cheminė ir mineralinė sudėtis

Table 2.5. Chemical and mineral composition of Portland limestone cement

CEM II/A-L 42,5 N	
Nustatytas parametras	Kiekis, %
SiO ₂	20,61
Al ₂ O ₃	5,45
Fe ₂ O ₃	3,36
CaO	63,42
MgO	3,84
SO ₃ ²⁻	0,80
Kiti	2,18
Netirpios dalelės	0,34
C ₃ S	57,26
C ₂ S	15,41
C ₃ A	8,68
C ₄ AF	10,15
Kiti	8,50

2.1 pav. Klinties portlandcemenčio dalelių dydžio pasiskirstymo kreivė

Fig. 2.1. Distribution curve of the size of the particles of Portland limestone concrete

Pagal granulimetrinės sudėties tyrimo rezultatus (2.1 pav.) klinties portlandcemenčio dalelių dydis kinta nuo 0,3 iki 140 μm . Dalelės pagal dydį yra pasiskirsčiusios taip: 50 % portlandcemenčio dalelių yra 7 μm ir mažesnio dydžio, kitų 40 % dalelių matmenys – nuo 7 μm iki 50 μm , likusios 10 % – dalelės, didesnės kaip 50 μm .

Klinties portlandcemenčio mikrostruktūros vaizdas pateiktas 2.2 paveiksle. Pastebėta, kad klinties portlandcemenčio milteliai yra netaisyklingos formos, jų dydis kinta plačiame intervale.

2.2 pav. Klinties portlandcemenčio mikrostruktūros vaizdas

Fig. 2.2. View of the microstructure of Portland limestone cement

Portlandcementis yra ne tik skirtingų mineralų konglomeratas, bet ir skirtingo dydžio cemento dalelių mišinys. Dėl to cemento hidratacija ir kietėjimas yra sudėtingas procesas, kurio metu skirtingo dydžio dalelės hidratuoja skirtingu greičiu, o mineralų hidratacijos procesai dengia vieni kitus (Balandis, Kaminskas, Vaickelionis 2006).

2.3 pav. Klienties portlandcemenčio rentgenograma: G – gipsas; F – C_4AF ; S – C_3S ;
C – $CaCO_3$; M – MgO

Fig. 2.3. X-ray pattern of Portland limestone cement: G – gypsum; F – C_4AF ; S – C_3S ;
C – $CaCO_3$; M – MgO

Pagal klienties portlandcemenčio rentgenofazinę analizę (2.3 pav.) identifi-kuoti mineralai yra šie: trikalcio silikatas C_3S (0,598, 0,353, 0,318, 0,297, 0,289, 0,277, 0,274, 0,260, 0,245, 0,232, 0,218, 0,197, 0,193, 0,183, 0,176, 0,169, 0,163, 0,154, 0,149) nm, kalcio karbonatas $CaCO_3$ (0,385, 0,303, 0,249, 0,228, 0,209, 0,191, 0,187, 0,160) nm, tetrakalcio aliumoferitas C_4AF (0,734, 0,269, 0,264) nm, magnio oksidas MgO (0,210) nm ir gipsas G (0,760) nm. Skripkiūnas (2007) teigė, kad MgO ir šarminių metalų oksidai – K_2O ir Na_2O – blogina cemento kokybę. Didesni MgO kiekiai yra žalingi, nes dėl pavėluotos jo hidratacijos ir su tuo susijusio tūrio padidėjimo jau sukiėtėjęs cementas gali supleišėti. Gipso dedama rišimuisi sulėtinti, nes grynas sumaltas klinkeris susi-riša labai greitai (Balandis *et al.* 1995).

2.2.2. Keramzito smėlis

Tyrimams buvo naudotas 2/4 frakcijos UAB „Saint-Gobain statybos gaminiai“ „Fibo“ keramzito smėlis. Šio užpildo charakteristikos pateiktos 2.6 lentelėje.

2.6 lentelė. Keramzito smėlio savybės

Table 2.6. Characteristics of the expanded-clay sand

Keramzito smėlio savybės			
piltinis tankis, kg/m^3	dalelių tankis, kg/m^3	tuštymėtumas, %	įmirkis, %
473	1020	53,63	33,55

Buvo nustatytas 2/4, 4/10 ir 10/20 frakcijų keramzito grūdelių atsparumas trupinimui. Keramzito atsparumo trupinimui tyrimo rezultatai pateikti 2.7 lentelėje. Taip pat buvo nustatyti 2/4, 4/10 ir 10/20 frakcijų keramzito grūdelių struktūriniai rodikliai ir vandens įmirkis, kurie pateikti 2.8 lentelėje.

2.7 lentelė. Keramzito atsparumas trupinimui
Table 2.7. Breaking resistance of expanded-clay

Keramzito frakcija	Atsparumas trupinimui, MPa
2/4	3,25
4/10	2,64
10/20	1,39

2.8 lentelė. Keramzito smėlio struktūriniai rodikliai ir įmirkis
Table 2.8. Structural parameters and impregnation of the expanded-clay sand

Keramzito frakcija	W_R , %	W_E , %	D , %	R , %	W , %
2/4	62,92	26,92	0,59	57,22	42,9
4/10	65,69	23,81	0,52	63,76	44,7
10/20	74,09	25,67	0,35	65,35	56,9

Pastaba: W_R – bendrasis atviras poringumas, W_E – efektyvus poringumas, D – sąlyginis porų ir kapiliarų sienelių storis, R – poringos erdvės rezervas, W – vandens įmirkis po 72 val.

Iš 2.8 lentelės matyti, kad didėjant keramzito frakcijai didėja grūdelių bendrasis atviras poringumas, poringos erdvės rezervas ir vandens įmirkis, mažėja sienelių storis.

2.4 pav. Keramzito granulės mikrostruktūros vaizdas
Fig. 2.4. View of the microstructure expanded-clay grain

Buvo atlikti 2/4 frakcijos keramzito smėlio paviršiaus mikrostruktūriniai tyrimai. 2.4 paveiksle pateiktas keramzito granulės paviršiaus mikrostruktūrinis vaizdas. Matyti, kad poros keramzito paviršiuje labai mažo skersmens – nuo 5 μm iki 60 μm , o didžiausią keramzito paviršiaus plotą užima sukepę molio mineralai. 2.4 paveiksle patvirtina teiginį, kad keramzito paviršiuje porų yra mažai. Prie tokio sukepusio ir nelygaus paviršiaus turėtų gerai prikibti cemento akmuo.

2.5 pav. Keramzito smėlio porų mikrostruktūra
Fig. 2.5. Microstructure of the expanded-clay pore

Tolesniuose tyrimuose ištyrus keramzito poras nuodugniau, pastebėta (2.5 pav.), kad vidinės keramzito mikroporos nėra uždaros, dėl to negalima patvirtinti teiginio, jog vanduo į jas nepatenka, kaip teigiama literatūroje (Gailius, Vėjelis 2009). Per tokią susisiekiančių porų struktūrą vanduo patenka į keramzitą, tačiau šių porų nėra daug, o vidinėje keramzito dalyje vyrauja uždaros poros ir kapiliarai.

2.6 pav. Keramzito smėlio rentgenograma: Š – špinelis; Q – kvarcas; A – anortitas;
H – hematitas

Fig. 2.6. X-ray pattern of the expanded-clay sand: Š – spinel; Q – silica; A – anorthite;
H – hematite

Iš 2.6 paveikslo, kuriame pateikta 2/4 frakcijos keramzito smėlio rentgenograma, matyti, kad susidarė tokie mineralai: špinelis Š (0,465, 0,287, 0,245, 0,203, 0,156, 0,143) nm, kvarcas Q (0,425, 0,335, 0,228, 0,223, 0,213, 0,198, 0,182, 0,167, 0,166, 0,154, 0,138) nm, anortitas A (0,320) nm, hematitas H (0,269, 0,251) nm.

2.2.3. Smėlis

Tyrimuose buvo naudotas 0/4 frakcijos Rizgonių karjero (Ukmergės r.) natūralus smėlis. Smėlio charakteristikos ir granulimetrinė sudėtis pateiktos 2.9 ir 2.10 lentelėse.

2.9 lentelė. Smėlio granulimetrinė sudėtis

Table 2.9. Sand's granulometric composition

Sieto akelių dydis, mm	Smėlio liekana ant sieto, g	Dalinė liekana, %	Suminė liekana, %	Išbira, %
5	53,49	5,349	5,349	94,651
2,5	248,48	24,848	30,197	69,803
1,25	262,28	26,228	56,425	43,575
0,63	205,02	20,502	76,927	23,073
0,315	151,44	15,144	92,071	7,929
0,14	50,11	5,011	97,082	2,918
0,063	7,78	0,778	97,86	2,14
<0,063	2,56	0,256	98,116	1,884
Masė ant dugno, g	18,84	1,884		

2.10 lentelė. Smulkaus užpildo charakteristikos

Table 2.10. Characteristics of the fine aggregate

Smėlio savybės			
piltinis tankis, kg/m ³	dalelių tankis, kg/m ³	tuštymėtumas, %	stambumo modulis
1620	2614	40,00	2,22

Iš 2.10 lentelės matyti, kad keramzitbetonio mišiniuose smėlio 1,25/0,63 mm yra net du kartus daugiau negu 0,14/0,315 frakcijos.

2.7 pav. Smėlio makrostruktūros vaizdas
Fig. 2.7. View of the structure of sand

Darbe naudoto smėlio makrostruktūros vaizdas pateiktas 2.7 paveiksle. Pastebėta, kad smėlio dalelės yra netaisyklingos grublėtos formos.

2.2.4. Aktyvūs mineraliniai priedai

Rengiant šį darbą buvo naudota AB „ORLEN Lietuva“ nemalto smulkiagrūdžio katalizatoriaus atlieka iš katalizinio naftos krekingo reaktoriaus (KAT). Panaudotas katalizatorius (kodas 16 08 04) Europos atliekų kataloge priskiriamas nepavojingų medžiagų grupei. Tai miltelių pavidalo atlieka. Nemalto ir nedegto katalizatoriaus atliekos cheminė sudėtis pateikta 2.11 lentelėje. Aktyviajame priede dominuoja silicio ir aliuminio oksidai, o titano, lantano, geležies ir fosforo oksidų yra mažiau. Jame yra šių medžiagų pėdsakų – CaO, MgO, K₂O ir Na₂O. Katalizatoriaus dalelių dydžių pasiskirstymas pateiktas 2.8 paveiksle.

2.11 lentelė. Cheminė katalizatoriaus sudėtis

Table 2.11. Chemical composition of the catalyst waste material

Cheminė sudėtis, %					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	La ₂ O ₃
55,15	40,94	0,90	1,48	0,11	1,41

Nagrinėjant atliekos dalelių pasiskirstymo kreivę (2.8 pav.) pastebėta, kad katalizatoriaus dalelių dydis kinta nuo 0,2 iki 112 μm. 80 % dalelių naudotame katalizatoriuje yra nuo 30 μm iki 112 μm.

Palyginus klinties portlandcemenčio ir katalizatoriaus dalelių dydį pastebėta, kad KAT smulkiųjų dalelių iki 7 μm beveik nėra. Tačiau klinties portlandcemenčio dalelių iki 7 μm yra 50 % (2.1 pav.).

2.8 pav. Katalizatoriaus dalelių dydžio pasiskirstymo kreivė

Fig. 2.8. Catalyst waste particle size distribution curve

Rentgeno difrakcinės analizės metodu ištirta katalizatoriaus kristalinė struktūra. Tai Y ceolitas su charakteringa fožazito $\text{Na}_2\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}]_2 \times 16\text{H}_2\text{O}$ kristalo struktūra (2.9 pav.). Katalizatoriaus atlieka sudaryta iš šių elementų: Fe – 0,14 %, Al – 2,47 %, Na – 0,14 %, Si – 2,41 %, S – 0,10 %, C – 24,31 %, La – 0,22 %, Ti – 0,10 %, Cu – 0,06 %, O_2 – 70,06 %.

2.9 pav. Katalizatoriaus rentgenograma: F – fožazitas

Fig. 2.9. X-ray pattern of catalyst: F – faujasite

Atlikus mikroskopinius tyrimus skenuojančiu mikroskopu, buvo nustatyta naudoto katalizatoriaus dalelių forma. Pastebėta, kad katalizatoriaus atlieka iš katalizinio krekingo reaktoriaus (2.10 pav.) yra sferinės formos, jų paviršius gana lygus.

2.10 pav. Katalizatoriaus dalelių mikrostruktūrinis vaizdas**Fig. 2.10.** Microstructure view of the catalyst's particles

Kita naudojama atlieka – iš AB „Umega“. Ji susidaro gaminant termoizoliacines medžiagas pramoniniams šiluminiams įrengimams izoliuoti. Iš šių termoizoliacinių medžiagų gaminamos plokštės, kurios suteikus formą šlifuojamos. Šios termoizoliacinės plokštės gali būti degtos ir nedegtos. Tyrimams buvo naudojamos šlifavimo metu gautos nedegtos plokščių atliekos.

2.11 pav. Nedegtos mulitinės vatos plaušelių mikrostruktūra**Fig. 2.11.** Microstructure of the strings of the unburned mullite wool

Skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu buvo ištirti nedegtos mulitinės vatos plaušeliai. 2.11 paveiksle a, matyti nevienodo ilgio ir orientacijos plaušai. Be plaušelių, mulitinėje vatoje dar aptinkama ir karoliukų. Realiai mažinti karoliukų skaičių ir jį minimizuoti galima išskendinant vatą prieš naudojimą mišiniuose. Tai ir buvo daroma.

Norint spręsti apie nedegtos mulitinės vatos plaušelių paviršiaus struktūrą buvo 8000 kartų padidintas plaušelių vaizdas (2.11 pav., b). Nustatyta, kad plaušelių paviršius beveik idealiai lygus. Mulitinės vatos atliekos gali būti priskiriamos plaušinių priedų grupei.

Pagal mineraloginę sudėtį šią atlieką (rentgenograma pateikta 2.12 pav.) galima vadinti mulitine vata (MV).

Nustačius cheminę mulitinės vatos elementinę sudėtį, nustatytas gana didelis Si (23,93 %) ir Al (15,18 %) kiekis (2.12 lentelė).

2.12 lentelė. Mulitinės vatos elementinė cheminė sudėtis

Table 2.12. Principle chemical composition of the mullite wool

Elementinė cheminė sudėtis, %						
C	O ₂	Al	Si	Ca	Ti	Fe
5,39	53,97	15,18	23,93	0,43	0,36	0,73

Iš 2.12 paveikslo matyti, kad pagrindinis atliekos mineralas yra mulitas $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (0,341, 0,256) nm, taip pat yra amorfinio SiO_2 (0,400) nm.

Pagal LST 1577.1 (1999) standartą buvo nustatytas atliekų piltinis tankis, savitasis tankis ir aktyviojo SiO_2 kiekis (2.13 lentelėje).

2.13 lentelė. Atliekų piltinis tankis, savitasis tankis ir aktyviojo SiO_2 kiekis

Table 2.13. Bulk density, specific density of waste materials and the amount of active SiO_2

Atlieka	Piltinis tankis, kg/m ³	Savitasis tankis, kg/m ³	Aktyviojo SiO_2 kiekis, %
KAT	967	2259	27
MV	220	1684	50

2.12 pav. Nedegtos mulitinės vatos rentgenograma: S – amorfinis SiO_2 ; M – mulitas
Fig. 2.12. X-ray diffraction of unburned mullite wool: S – amorphous SiO_2 ; M – mullite

2.13 pav. Atliekų sumaišytų su kalkėmis vaizdas po aktyvumo nustatymo: a – nedegta mulitinė vata; b – katalizatorius

Fig. 2.13. View of the waste materials mixed with lime after the determination of activeness: a – unburned mullite wool; b – catalyst

Pagal tyrimo metodiką, aprašytą literatūroje (Martusevičius, Kaminskas, Mitzas 2002), buvo nustatyta, kad katalizatoriaus ir nedegtos mulitinės atliekos priedai yra aktyvūs. Iš 2.13 paveikslo matyti, kad MV atliekos priedas ir KAT yra kieti po septynių parų kietėjimo kartu su kalkėmis ir po trijų parų mirkymo vandenyje.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Žinomais ir specialiais metodais nustatytos klinties portlandcemenčio, keramzito smėlio, natūralaus smėlio, nemalto katalizatoriaus atliekos ir nedegtos mulitinės vatos savybės. Žaliavos, technogeninių atliekų ir keramzitbetonio bandinių savybės nustatytos pagal galiojančius Lietuvos perimtus Europos standartų reikalavimus.

2. Nustatytas keramzito smėlio atsparumas trypinimui (1,39–3,25 MPa) bei keramzitbetonio struktūriniai rodikliai. Skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu ištirtos nemalto smulkiagrūdžio katalizatoriaus dalelės, kurios yra sferinės formos, o jų dydis kinta nuo 0,2 iki 112 nm bei nedegtos mulitinės vatos plaušelių paviršius, kuris yra lygus. Nustatyta, kad nemalto katalizatoriaus atlieka ir nedegta mulitinė vata – aktyvūs mineraliniai priedai.

Keramzitbetonio su katalizatoriaus atlieka tyrimų rezultatai

Sukietėjusio keramzitbetonio savybės priklauso nuo formavimo masės komponentų ir jų kiekybinio santykio. Naudojant formavimo masėms atliekinius priedus reikia ištirti atliekų savybes ir nustatyti šių priedų poveikį sukietėjusio produkto savybėms. Darbe buvo tiriami keramzitbetonio bandiniai, kuriuose buvo keičiamas atliekos kiekis. Palyginimui buvo naudojami kontroliniai betono bandiniai be priedų.

Šiame darbo skyriuje pateikti keramzitbetonio bandinių, kurių formavimo masė susideda iš CEM II/A-L 42,5 N klinties portlandcemenčio, 2/4 frakcijos keramzito smėlio, 0/4 frakcijos natūralaus smėlio bei katalizatoriaus atliekos (KAT), tyrimo rezultatai.

Šio skyriaus medžiaga publikuota Vaičienės ir kitų autorių darbuose (Vaičienė 2007; Vaičienė 2009; Mačiulaitis, Vaičienė, Žurauskienė 2009a; Mačiulaitis, Vaičienė, Žurauskienė 2009b; Vaičienė, Malaiškienė 2010; Mačiulaitis, Vaičienė, Žurauskienė 2010).

3.1. Betono bandinių pagrindinės fizikinės ir mechaninės charakteristikos

Betono kietėjimas – sudėtingas cheminių ir fizikinių reiškinių procesas, kuris vyksta sumaišius rišamąją medžiagą su vandeniu (Balandis *et al.* 1995).

Hidratacijos proceso pradžioje, kai vanduo sudrėkina cemento daleles, gaunama plastiška tešla, kurioje cemento dalelės yra nepakitusios. Iš persotinto tirpalo kristalinasi portlanditas ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ir prasideda SO_4^{2-} jonų sąveika su C_3A bei etringito adatinių kristalų plėvelės susidarymas. Ši plėvelė lėtina greitą C_3A koaguliacinės struktūros susidarymą ir sudaro prielaidas cementui rištis reikiamu greičiu (≥ 60 min.) (Eisinas, Baltakys 2009).

Naudojant portlandcementą, kurio pagrindą sudaro klinkerio mineralai C_2S , C_3S , C_3A ir C_4AF , vyksta mineralų hidrolizė ir hidratacija. Mineralai C_2S ir C_3A hidratuoja, t. y. prijungia vandenį. Trikalcio hidroaluminatas reaguoja su gipsu, įdėtu į cementą, ir sudaro trisulfatį trikalcio hidrosulfoaluminatą – etringitą (Mituzas 1999).

Cemento akmens struktūra daug sudėtingesnė negu betono mezo- ir makrostruktūra. Sukietėjusį cemento akmenį, kuris gaunamas iš cemento tešlos, sudaro neprisijungusio vandens klinkerio dalelių liekanos ir naujadarai, susidarę cemento hidratacijos metu, bei uždaros oro poros. Cemento hidratacijos naujadarai – tai C-S-H gelis su gelio ir kapiliarinėmis poromis (Vaitkevičius 2002).

Etringito ir kalcio hidrosilikatų kristalai auga nuo cemento dalelių paviršiaus porų link. Jie susipina, todėl pradeda mažėti cemento akmens poringumas ir didėja cemento akmens stiprumas. Cemento akmens stiprumas dėl hidratų persikristalinimo procesų ir cemento dalelių branduolių hidratacijos ir toliau didėja, o po vienerių metų jis būna 1,5 karto didesnis už cemento akmens stiprumą po 28 parų. Didžiausią įtaką cemento akmens stiprumo didėjimui turi pusiau kristaliniai kalcio hidrosilikatai. Į cemento akmens stiprumą indėlį įneša visi klinkerio mineralai, nors jų hidratų vaidmuo cemento akmens struktūroje yra nevienodas (Balandis, Kaminskas, Vaickelionis 2006).

Kaip žinoma, aktyviausias mineralas yra trikalcio aluminatas, kurio hidratacija vyksta išsiskiriant dideliame kiekiui šilumos ir pasibaigia praktiškai po kelių parų. Pradinės hidratinės termodinamiškai nestabilios fazės yra plokšteliniai heksagonalinės formos kristalai, persikristalizuojantys toliau į kubinius hidroaluminatus C_3AH_6 tipo (Шпынова, Чих, Саницкий 1981).

Į mišinį dedant skirtingą kiekį KAT atliekos, buvo gautas keramzitbetonis, besiskiriantis ne tik tankiu, bet ir gniuždymo stipriu.

Tyrimų rezultatai rodo (3.1 pav.), kad maišant keramzitbetonį su skirtingu kiekiu KAT priedo bandinių tankis kinta nuo 1371 iki 1458 kg/m^3 .

Eksperimentinių tyrimų metu išmatuoti vidutiniai tankio dydžiai svyruoja plačiame intervale: vidutinis K0 bandinių tankis siekia 1387 kg/m^3 , K1 bandinių

1380 kg/m³, K2 bandinių – 1399 kg/m³, K3 bandinių – 1371 kg/m³, K4 bandinių – 1445 kg/m³, K5 – 1384 kg/m³, K6 – 1458 kg/m³.

Iš 3.1 paveikslo matyti, kad, įdėjus į mišinį 15 % KAT atliekos, tankis padidėjo 4,2 %, palyginti su kontroliniais, padidinus KAT atliekos kiekį iki 30 %, tankis padidėjo 5,1 %, lyginant su kontroliniais.

3.1 pav. Keramzitbetonio bandinių su KAT atlieka vidutinės tankio vertės: K0 – be atliekos; K1 – su 3 % atliekos; K2 – su 5 % atliekos; K3 – su 10 % atliekos; K4 – su 15 % atliekos; K5 – su 20 % atliekos; K6 – su 30 % atliekos

Fig. 3.1. Average density values of the expanded-clay lightweight concrete samples with CAT waste: K0 – without waste; K1 – with 3 % of waste; K2 – with 5 % of waste; K3 – with 10 % of waste; K4 – with 15 % of waste; K5 – with 20 % of waste; K6 – with 30 % of waste

Disertaciniame darbe tyrimų metu buvo nustatytas keramzitbetonio bandinių gniuždymo stipris po 2, 14 ir 28 kietėjimo parų. Atliekant eksperimentinius tyrimus nustatyti vidutiniai gniuždymo stiprio dydžiai pateikti 3.2 paveiksle.

Iš 3.2 paveikslo pateiktų rezultatų išeina, kad KAT atliekos kiekio didėjimas betono mišinyje stipriai veikia ankstyvąjį bandinių gniuždymo stiprį po dviejų parų kietėjimo. Didėjant atliekos kiekiui ankstyvasis bandinių stipris mažėja. Tai galima paaiškinti tuo, kad didinant atliekos kiekį bandiniuose mažėja portland-cemenčio kiekis. Didžiausias gautas bandinių, kietėjusių 14 parų, ankstyvasis gniuždymo stipris yra kontrolinių bandinių, jis siekia 16,2 MPa. Iš bandinių su priedu didžiausiu ankstyvuojų gniuždymo stipriu pasižymi bandiniai, kuriuose yra 10 % ir 15 % atliekos, atitinkamai 14,7 MPa ir 14,5 MPa. Mažiausios gniuždymo stiprio rodiklių vertės gautos tų bandinių, kurie buvo suformuoti iš K1 mišinio (3 % atliekos) – 12,2 MPa (3.2 pav.).

Tolesnių tyrimų rezultatai rodo (3.2 pav. po 28 parų kietėjimo), kad iš kontrolinio mišinio pagamintų bandinių vidutinis gniuždymo stipris yra 16,4 MPa. Keramzitbetonyje dalį cemento pakeitus KAT atlieka, vidutiniai gniuždymo

stiprio rezultatai svyruoja gana plačiai: mažiausias vidutinis bandinių gniuždymo stipris siekia 13,5 MPa (mišinys K1), o didžiausias – 18,9 MPa (mišinys K3).

3.2 pav. Keramzitbetonio bandinių su KAT atlieka vidutinės gniuždymo stiprio vertės:
K0 – be atliekos; K1 – su 3 % atliekos; K2 – su 5 % atliekos; K3 – su 10 % atliekos;
K4 – su 15 % atliekos; K5 – su 20 % atliekos; K6 – su 30 % atliekos

Fig. 3.2. Average compressive strength values of the expanded-clay lightweight concrete samples with CAT waste: K0 – without waste; K1 – with 3 % of waste;
K2 – with 5 % of waste; K3 – with 10 % of waste; K4 – with 15 % of waste;
K5 – with 20 % of waste; K6 – with 30 % of waste

Gautos didžiausios vidutinės gniuždymo stiprio vertės yra tų bandinių, kuriuose pakeista 10 % cemento KAT atlieka, skaičiuojant nuo cemento masės. Iš 3.2 paveikslą matyti, kad gniuždymo stipris, kai formavimo mišinyje buvo 10 % atliekos, padidėjo 15,2 %, palyginti su kontroliniais bandiniais. Tyrimai parodė, kad po 28 parų kietėjimo bandinių, kuriuose 3 % ir 5 % cemento pakeista KAT atlieka, gniuždymo stipris sumažėjo atitinkamai 26,6 % ir 25,0 %, lyginant su kontrolinių bandinių stipriu. Mažiausias šių rodiklių vertes bandiniuose galėjo lemti etringito susidarymas po 28 parų kietėjimo. Mituzo (2001b, 1999) teigimu, plyšiuose augančių hidratuoto cemento mineralų (pvz., etringito) įtaka gali būti jaučiama betono gniuždymo stipriui. Dėl šio mineralo laikui bėgant sumažėja cemento akmens stipris. Bandiniuose, pagamintuose iš mišinių K1 ir K2, etringitą susidarė jau po 28 kietėjimo parų ir tai turėjo įtakos bandinių gniuždymo stipriui.

Iš K5 mišinio pagamintų bandinių vidutinio gniuždymo stiprio vertės sumažėjo, o vienas iš galimų paaiškinimų – portlandito smailių intensyvumo sumažėjimas, kuo didesnis cemento kiekis pakeistas atlieka, tuo mažiau Ca(OH)_2 susidaro po 28 parų kietėjimo (3.2 pav.).

Pagal metodiką (Laukaitis 2000) buvo perskaičiuotos vidutinės gniuždymo stiprio vertės (pasirinktas tankis $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$) pateiktos 3.3 paveiksle. Iš

3.3 paveikslo pateiktų duomenų matyti, kad mūsų tyrimuose keičiant KAT atliekos kiekį bandinių perskaičiuotieji gniuždymo stipriai, esant vienodam tankiui, po dviejų kietėjimo parų yra nuo 6,9 MPa iki 2,6 MPa, po 14 kietėjimo parų gniuždymo stipris kinta nuo 12,6 iki 8,8 MPa, o po 28 kietėjimo parų gniuždymo stiprio vertės kinta nuo 14,8 MPa iki 10,4 MPa.

3.3 pav. Keramzitbetonio bandinių su KAT atlieka perskaičiuotos vidutinės gniuždymo stiprio vertės: K0 – be atliekos; K1 – su 3 % atliekos; K2 – su 5 % atliekos; K3 – su 10 % atliekos; K4 – su 15 % atliekos; K5 – su 20 % atliekos; K6 – su 30 % atliekos

Fig. 3.3. Recalculated average compressive strength values of the expanded-clay lightweight concrete samples with CAT waste: K0 – without waste; K1 – with 3 % of waste; K2 – with 5 % of waste; K3 – with 10 % of waste; K4 – with 15 % of waste;

K5 – with 20 % of waste; K6 – with 30 % of waste

Tseng, Huang, Hsu (2005) savo darbe nustatė, kad katalizatoriaus atlieka skiediniuose, kurios chemine sudėtis: SiO_2 – 50,1 %, Al_2O_3 – 38,5 %, Fe_2O_3 – 1,37 %, MgO – 0,71 %, padidina bandinių gniuždymo stiprį iki 26 %, o betonuose iki 16 %.

Atlikus tyrimus nustatyta, kad formavimo masių K0 ir K3 pH yra šarminis ir atitinkamai kinta intervalais 11,8–11,9 ir 11,3–11,7, tačiau vandenyje katalizatoriaus pH artėja prie neutralaus ir siekia 6,1–6,3. Mokslininkų nustatyta, kad vandenyje kitokio naudoto katalizatoriaus pH siekia 4–4,52 (Pacewska *et al.* 2002a), 3,82 (Su *et al.* 2000) ir 7,88 (Paya, Monzo, Borrachero 2001).

Buvo nustatytas ir keramzitbetonio bandinių šilumos laidumo koeficientas. Žinoma, kad šilumos laidumui poveikį turi porų dydis ir forma: kuo mažesnis porų dydis, tuo mažesnis šilumos laidumas, esant vienodam poringumui. Mažėjant lengvojo betono poringumui drėgmė itin padidina šilumos laidumo koeficiento vertę (Спивак *et al.* 1963).

Mūsų tyrimų rezultatai parodė, kad vidutinio tankio (1387 kg/m^3) kontrolinių bandinių K0 šilumos laidumo koeficiento vidutinė vertė yra $0,462 \text{ W/mK}$.

Buvo galima daryti prielaidą, kad KAT atliekos įterpimas į betono mišinį darys nedidelę įtaką šilumos laidumo koeficiento vertėms. Tai pasitvirtino K3 bandinių atveju, kurių vidutinis tankis buvo 1371 kg/m^3 , o šilumos laidumo koeficiento vidutinė vertė siekė $0,455 \text{ W/mK}$.

3.4 pav. Bandinio vaizdas po gniuždymo
Fig. 3.4. View of the sample after the compression

3.4 paveiksle parodytas sugniuždytas keramzitbetonio bandinys, kietėjęs 28 paras, pagamintas iš mišinio, kurio žymuo K0. Reikia akcentuoti, kad cemento akmens stipris yra didesnis nei keramzito granulių stipris ir gniuždymo metu dažniausia suirimas vyksta per keramzito granules ir mažokai per granulių sąlyčio zoną su cemento akmeniu.

Skripkiūnas, Vaitkevičius (2001) akcentavo, kad betono su poringuoju stambiuoju užpildu – keramzitu – irimas vyksta per užpildo daleles, o ne per skiedinio ir užpildo kontakto zoną, kaip būna bandant betoną su tankiu stambiuoju užpildu. Cemento akmens gniuždymo stiprį daugiausia lemia jo poringumas ir mikroplyšiai, susidarantys hidratacijos arba kietėjimo metu (Mituzas, Mituzas, Kaminskas 2001a).

3.2. Rentgenografiniai betono bandinių tyrimų rezultatai

Disertaciniame darbe buvo tyrinėjami keramzitbetonio bandinių, kietėjusių 28 paras, rentgenofazinės analizės duomenys. Pabrėžtina, kad vandens ir rišiklio (cemento ir katalizatoriaus) santykis, atsižvelgiant į norą palaikyti vienodą mišinio reologiją (S1 klasė), visuose tyrimuose pasirinktas vienodas (apie 0,52). Manyta, kad tokio santykio pakaks vykti cemento ir aktyvaus KAT priedo hidratacijos procesams (2.2 lentelė).

3.5 pav. Kontrolinių keramzitbetonio skiedinio dalies bandinių rentgenograma:

P – portlanditas; Q – kvarcas; K – kalcitas; D – dolomitas; L – lauko špatai

Fig. 3.5. X-ray pattern of the grout part of expanded-clay lightweight concrete of reference samples: P – portlandite; Q – silica; K – calcite; D – dolomite; L – feldspars

Konkrečiai buvo tiriama bandinių skiedinio dalis be keramzito granulių. Kontrolinių bandinių rentgenograma pateikta 3.5 paveiksle.

Analizuojant keramzitbetonio (K0) (3.5 pav.) rentgeno difrakcinės analizės smailes, buvo identifikuotas vienas pagrindinių cemento hidratacijos junginių – portlanditas P, kuriam būdingi atstumai d tarp plokštumų (0,491, 0,263, 0,193 nm). Kvarcas Q (0,426, 0,335, 0,246, 0,229, 0,224, 0,213, 0,198, 0,182 nm), kalcitas K (0,385, 0,304, 0,248, 0,229, 0,209, 0,191, 0,187 nm), dolomitas D (0,289, 0,240, 0,220, 0,202, 0,179 nm) ir šiek tiek lauko špatų L (0,325, 0,319 nm) atsiranda iš smėlio dalelių, esančių skiedinio dalyje. Šie rezultatai rodo, kad minėtas V/C santykis užtikrina normalią hidratacijos proceso eigą.

Atlikus K1 ir K2 bandinių skiedinio dalies rentgenografinę analizę (3.6 ir 3.7 pav.), nustatyti šie mineralai: etringitas, portlanditas, kvarcas, kalcitas, dolomitas, lauko špatai. Be to, po 28 parų kietėjimo K1 ir K2 bandiniuose identifikuoti nehidratuoto alito (C_3S) difrakciniai maksimumai, kuriems būdingi atstu-

3.7 pav. Keramzitbetonio skiedinio dalies su 5 % katalizatoriaus atliekos bandinių rentgenograma: E – etringitas; P – portlanditas; Q – kvarcas; K – kalcitas; D – dolomitas; L – lauko špatai; CS – alitas (C_3S)

Fig. 3.7. X-ray pattern of the grout part with 5 % of catalyst waste of expanded-clay lightweight concrete samples: E – ettringite; P – portlandite; Q – silica; K – calcite; D – dolomite; L – feldspars; CS – alite (C_3S)

Pradiniu rišimosi laikotarpiu etringito susidarymas reguliuoja mišinio mineralų hidratacijos procesą, susidariusios etringito plėvelės apie cemento grūdelius lėtina kitų cemento mineralų hidrataciją ir kartu lėtina mišinio rišimąsi (Martusevičius, Kaminskas, Mituzas 2002). Etringitas ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$) – gana svarbus cemento chemijoje. Jis būna naudingas, kai susidaro plastiškoje masėje, ir žalingas, kai susidaro jau sukietėjusiame cemente. Norint sureguliuoti portlandcemenčio rišimąsi, gipso dedama tik tiek, kad etringitas baigtų susidaryti dar plastiškoje masėje. Jei gipso pridedama daugiau, jis baigia susidaryti jau sukietėjusiame cemente, padidindamas jo tūrį, nes absoliutinis etringito tūris yra kelis kartus didesnis už prieš reakciją buvusių kietos fazės komponentų tūrį (Balandis *et al.* 1995). Tačiau paskui etringito plėvelė pradeda irti ir hidratacijos reakcija vyksta gilesniuose trikalčio aluminato sluoksniuose. Heksagonaliniai hidratatai sudaro kietus C_4AH_{13} junginius (Мчедлов-Петросян 1988).

Iš 3.8 paveikslo, kai mišinyje buvo panaudota 10 % atliekos (K3), matyti, kad po 28 kietėjimo parų skiedinio dalyje yra susidarę tokie mineralai: portlanditas P (0,491, 0,193 nm), kvarcas Q (0,426, 0,335, 0,246, 0,228, 0,224, 0,213, 0,198, 0,182 nm), kalcitas K (0,385, 0,304, 0,249, 0,228, 0,209, 0,191, 0,187 nm), dolomitas D (0,289, 0,269, 0,219 nm) ir lauko špatai L (0,403, 0,325, 0,319 nm). Tai pagal naujadarų sudėtį tapatu kontrolinio bandinio skiedinio dalies kristalų sudėčiai.

Galima manyti, kad šio keramzitbetonio bandinio bus didesnės ir gniuždymo stiprio vertės (skiedinio dalyje nėra etringito bei alito). Šiuo atveju gautos maksimalios gniuždymo stiprio vertės, viršijančios kontrolinių bandinių stiprį.

3.8 pav. Keramzitbetonio skiedinio dalies su 10 % katalizatoriaus atliekos bandinių rentgenograma: P – portlanditas; Q – kvarcas; K – kalcitas; D – dolomitas; L – lauko špatai

Fig. 3.8. X-ray pattern of the grout part with 10 % of catalyst waste of expanded-clay lightweight concrete samples: P – portlandite; Q – silica; K – calcite; D – dolomite; L – feldspars

3.9 pav. Keramzitbetonio skiedinio dalies su 15 % katalizatoriaus atliekos bandinių rentgenograma: G – gipsas; P – portlanditas; Q – kvarcas; K – kalcitas; D – dolomitas; L – lauko špatai; CS – alitas (C_3S)

Fig. 3.9. X-ray pattern of the grout part with 15 % of catalyst waste of expanded-clay lightweight concrete samples: G – gypsum; P – portlandite; Q – silica; K – calcite; D – dolomite; L – feldspars; CS – alite (C_3S)

Iš keramzitbetonio skiedinio dalies rentgenografinės analizės, pateiktos 3.9 paveiksle, matyti, kad šios sudėties (K4 mišinys, kuriame 15 % atliekos) skiedinio dalį, kaip ir anksčiau minėtame bandinyje su 10 % KAT priedo, sudarantys mineralai tie patys: portlanditas P (0,491, 0,193 nm), kvarcas Q (0,426, 0,335, 0,246, 0,228, 0,224, 0,213, 0,198, 0,182 nm), kalcitas K (0,385, 0,304, 0,249, 0,228, 0,209, 0,191, 0,187 nm), dolomitas D (0,289, 0,269, 0,219 nm),

lauko špatai L (0,403, 0,325, 0,319 nm). Tačiau vėl rasta nehidratuotų C_3S kristalų, tai patvirtina difrakcinės smailės (0,278, 0,273 nm). Taip pat yra gipsą charakterizuojanti difrakcinė smailė (0,764 nm). Būtent šių mineralų susidarymu ir galima paaiškinti bandinių gniuždymo stiprio reikšmių, lyginant su kontroliniais bandiniais, sumažėjimą. Tačiau gipso identifikavimas skiedinio dalyje rodo, kad būta jo pertekliaus arba reakcija vyko kita linkme.

3.10 pav. Keramzitbetonio skiedinio dalies su 20 % katalizatoriaus atliekos bandinių rentgenograma: P – portlanditas; Q – kvarcas; K – kalcitas; D – dolomitas; L – lauko špatai

Fig. 3.10. X-ray pattern of the grout part with 20 % of catalyst waste of expanded-clay lightweight concrete samples: P – portlandite; Q – silica; K – calcite; D – dolomite; L – feldspars

Keramzitbetonio skiedinio dalies bandinių su 20 % atliekos (K5) (3.10 pav.), identifikuoti mineralai yra šie: portlanditas P (0,491 nm), kvarcas Q (0,426, 0,335, 0,246, 0,228, 0,221, 0,213, 0,198, 0,182 nm), kalcitas K (0,386, 0,304, 0,249, 0,228, 0,209, 0,193, 0,191, 0,187 nm), dolomitas D (0,370, 0,289, 0,270, 0,254, 0,240, 0,219, 0,202, 0,187, 0,179 nm) ir lauko špatai L (0,325, 0,319 nm).

Rentgeno difrakcinės analizės duomenimis, keramzitbetonio skiedinio dalies bandinių su 30 % atliekos (K6) (3.11 pav.) mineralai yra šie: portlanditas P (0,491, 0,260 nm), kvarcas Q (0,428, 0,335, 0,246, 0,228, 0,224, 0,213, 0,198, 0,182 nm), kalcitas K (0,385, 0,304, 0,249, 0,228, 0,209, 0,191, 0,187 nm), dolomitas D (0,289, 0,274, 0,266, 0,254, 0,239, 0,219, 0,202, 0,180, 0,179 nm) ir lauko špatai L (0,648, 0,372, 0,357, 0,328, 0,319 nm). Šiais, kaip ir K0 bei K3 atvejais, randame tik portlanditą, kvarcą, kalcitą, dolomitą ir lauko špatus, o vidutinės gniuždymo stiprio vertės svyruoja nedaug: nuo 15,8 MPa iki 18,9 MPa.

Vienas iš galimų variantų, kodėl šiuose bandiniuose sureagavęs visas alitas ir neatsiranda etringito pėdsakų bei nėra gipso, galėtų būti kristalizacijos proceso fliktuacijos, kurias lemia nepusiausvyrų procesų termodinamika

(Физический... 1984). To priežastis gali būti skirtingas naujadarų kristalų dydis bei vakansijų ar dislokacijų skaičius juose. Pagaliau neaišku, koks yra tų mineralų absoliutusias skaičius, ypač kai santykiškai sumažėja cemento kiekis (Адамсон 1979).

3.11 pav. Keramzitbetonio skiedinio dalies su 30 % katalizatoriaus atliekos bandinių rentgenograma: P – portlanditas; Q – kvarcas; K – kalcitas; D – dolomitas; L – lauko špatai

Fig. 3.11. X-ray pattern of the grout part with 30 % of catalyst waste of expanded-clay lightweight concrete samples: P – portlandite; Q – silica; K – calcite; D – dolomite; L – feldspars

Kadangi, rentgeno difrakcinės analizės duomenimis (3.10, 3.11 pav.), etringito nesusidaro, galima daryti prielaidą, kad stiprio svyravimai negali būti aiškunami etringito ar gipso susidarymu (jų neaptinkama). Tačiau tai gali būti paaiškinama mažėjančiu cemento kiekiu.

3.3. Mišinių egzoterminio efekto tyrimai

Hidratuojant cementui, cemento tešloje išsiskiria gana dideli šilumos kiekiai, kurie įvairiais cemento hidratacijos etapais yra skirtingi (Тейлор 1996). Siekiant nustatyti KAT atliekos poveikį portlandcemenčio hidratacijai, buvo atlikti lyginamieji keramzitbetonio mišinio su KAT atlieka ir kontrolinio mišinio tyrimai.

Kai kurie autoriai (Мчедлов-Петросян, Ушеров-Маршак, Урженко 1984) aprašo bandymą, kuriame naudoti ceolitai. Jų cheminė sudėtis tokia: SiO_2 – 68,69 %, Al_2O_3 – 11,72 %, Fe_2O_3 – 3,46 %, CaO – 5,65 %, MgO – 1,57 %, K_2O – 2,29 % ir Na_2O – 4,2 %. Mokslininkai nustatė, kad ceolitai prisideda prie ankstyvų hidratacijos stadijų intensyvinimo. Šio priedo sąveikos mechanizmas su cementu yra analogiškas pucolanų hidratacijos poveikio procesui. Ceolitas (cheminė formulė $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_{2,4}\text{O}_{8,8} \cdot 6,7\text{H}_2\text{O}$) yra mikroporinga kristalinė medžia-

ga – sintetinė gamtinio mineralo aliumosilikato fožazito forma. Jo struktūrinis fragmentas susideda iš 8 sodalito gardelių ir 16 heksagonalinių prizmių (Schenkel 2004).

Temperatūros matavimai keramzitbetonio mišinių rišimosi ir kietėjimo metu pateikti 3.12 paveiksle. Rezultatai rodo, kad gautos egzoterminių efektų kreivės priklausomai nuo naudoto KAT atliekos kiekio mišiniuose yra labai skirtingos.

Gaunami įdomūs ir iki šiol nenagrinėti egzoterminiai efektai keramzitbetonio mišiniuose.

3.12 pav. Mišinių egzoterminio efekto tyrimų rezultatai: K0 – keramzitbetonio mišinys be atliekos; K2 – su 5 % atliekos; K3 – su 10 % atliekos; K4 – su 15 % atliekos, K5 – su 20 % atliekos; K6 – su 30 % atliekos

Fig. 3.12. Results of the exothermic effect analysis of the mixtures: K0 – mixture of the expanded-clay lightweight concrete without waste material; K2 – with 5 % of waste; K3 – with 10 % of waste; K4 – with 15 % of waste; K5 – with 20 % of waste; K6 – with 30 % of waste

Iš 3.12 paveikslo matyti, kad kontrolinis keramzitbetonio mišinys K0 hidratacijos metu įkaito iki 30,95 °C, o K2 (kuriame buvo 5 % KAT atliekos) iki 31,96 °C. Kontrolinis mišinys maksimalią egzoterminio proceso temperatūrą pasiekė po 981 minučių, o mišinys K2 – po 904 minučių.

Skripkiūnas (2007) teigė, kad šilumos išsiskyrimas cementui kietėjant (cemento egzotermija) priklauso nuo mineralinės sudėties. Mišinio K3 (su 10 % KAT atliekos) aukščiausia hidratacijos temperatūra buvo 31,94 °C, o hidratacijos procesas pasiekė maksimalias rodiklių vertes po 824 minučių. Padidinus

KAT atliekos kiekį mišinyje iki 15 % K4, maksimali portlandcemenčio hidratacijos temperatūra buvo 30,81 °C, o hidratacijos procesas pasiekė maksimalias vertes tik po 669 minučių. Mišinio K5 (su 20 % KAT atliekos) aukščiausia hidratacijos temperatūra buvo 30,80 °C, o hidratacijos procesas pasiekė maksimalias rodiklių vertes po 653 minučių. Mišinio K6 (su 30 % KAT atliekos) aukščiausia hidratacijos temperatūra buvo 26,05 °C, o hidratacijos procesas pasiekė maksimalias rodiklių vertes po 623 minučių. Pasiekusi maksimalią vertę, egzotermijos proceso temperatūra pradeda mažėti, ir po tam tikro laiko susilygina su aplinkos temperatūra.

Atliktų tyrimų metu gauti rezultatai rodo, kad, didinant KAT atliekos kiekį K4, K5 ir K6 mišiniuose, didesnė temperatūra juose pastebima pradžioje sumaišius su vandeniu. Temperatūra iškart pakyla apie 1 °C (3.12 pav. K4, K5 ir K6 kreivės). Galbūt tai būtų galima paaiškinti tuo, kad, prasidėjus ankstyvosioms hidratacijos reakcijoms, greičiau išsiskiria šiluma (Teĭлоп 1996).

Gauti rezultatai rodo, kad K2 ir K3 mišinių maksimali hidratacijos temperatūra beveik vienoda, t. y. 31,96 ir 31,94 °C.

3.12 paveikslą matyti, kad padidinus atliekos kiekį iki 5 % hidratacijos proceso maksimalios temperatūros pasiekimo trukmė yra mažesnė už kontrolinio mišinio tik 77 min. Didinant KAT atliekos kiekį iki 10 % (3.12 pav.) hidratacijos procesas temperatūrų maksimumus pasiekia 157 min. greičiau (mišinys K3), o 312 min. greičiau (mišinys K4) nei kontrolinis. Kai mišinyje 20 % ir 30 %, nustatyta, kad hidratacijos proceso maksimalios temperatūros pasiekimo trukmė yra mažesnė už kontrolinio mišinio atitinkamai 328 ir 358 min.

Aleknevičius (2010) nustatė, kad didinant katalizatoriaus, kurio cheminė sudėtis tokia: Al_2O_3 – 39,4 %, SiO_2 – 50,1 %, Fe_2O_3 – 1,3 %, SO_x – 2,3 %, CaO – 0,5 %, MgO – 0,49 %, Na_2O – 0,2 %, K_2O – 0,07 %, Mn_2O_3 – 0,06 %, kiekį ugniai atspariame betone didėja ir egzoterminio proceso temperatūros maksimumas, palyginti su betonu be priedo. Šis priedas greitina ugniai atsparaus betono hidrataciją.

Apibendrinant K0–K6 mišinių egzoterminio efekto tyrimų rezultatus galima teigti, kad didinant KAT atliekos kiekį sumažėja maksimalios temperatūros pasiekimo trukmė, o tai reiškia hidratacijos proceso paspartinimą pradinio cemento hidratacijos periodu. Tai gali kartu paspartinti ir cemento tešlos, ir betono mišinio rišimosi procesą.

Bandinių, išlaikytų vandenyje atitinkamą laiką (2, 14, 28 paras), vandens poreikio rodiklio m vertės, prieš nustatant stiprį, pateiktos 3.1 lentelėje.

Gauti rezultatai rodo (3.1 lentelė), kad K1, K2 ir K3 bandinių vertės yra teigiamos, o tai reiškia vandens perteklių, lyginant su bandiniais, kuriuose nėra KAT priedo, viršijančio 10 %. Kadangi vandens yra pakankamai, jo turėtų užtekti hidratacijos reakcijoms vykti greitai arba netgi pagreitinai. Tokios išvados patvirtina termografinių tyrimų rezultatus.

K4, K5 ir K6 bandinių, palyginti su kontroliniais, vandens vertės yra neigiamos, o tai reiškia jo trūkumą, lyginant su bandiniais, kuriuose KAT priedo mažiau nei 10 %.

3.1 lentelė. Kontrolinių ir tiriamųjų bandinių vandens poreikio palyginimas
Table 3.1. Comparison of water demand for reference and investigated samples

Mišinio žymuo	Po 2 parų kietėjimo	Po 14 parų kietėjimo	Po 28 parų kietėjimo
	masių skirtumas, %	masių skirtumas, %	masių skirtumas, %
K1	0,02	1,86	0,89
K2	0,58	1,96	0,21
K3	0,18	1,11	0,33
K4	-1,65	-1,59	-1,74
K5	-0,96	-1,16	-1,00
K6	-8,63	-9,83	-8,42

Iš šių tyrimų rezultatų galima daryti išvadą, kad geriausios struktūros keramzitbetonis susidarytų, kai vandens pareikalavimo rodiklio vertė m būtų lygi nuliui. Katalizatoriaus atliekos koncentracijos aspektu tai būtų 10 %. Šią geriausią KAT koncentraciją patvirtina ir keramzitbetonio gniuždymo stiprio rezultatai, aprašyti 3.1 skyriuje.

3.4. Betono bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal pagrindinius ir išvestinius struktūros rodiklius

Cemento akmenyje kietėjimo metu dalį tūrio gali užimti laisvasis vanduo, jei jo buvo daugiau negu reikia cemento hidratacijai. Toks vanduo gali išgaruoti ir cemento akmenyje palikti kapiliarinių porų. Labai svarbu nustatyti cemento akmens porų didumą, jų pasiskirstymą pagal skersmenį ir visą poringumą, nes tarp poringumo ir stiprumo yra koreliacinis ryšis. Be to, nuo poringumo priklauso gaminių vandens įgeriamumas ir atsparumas šalčiui (Deltuva 1998).

Pasak Skripkiūno (2007), cemento akmens atsparumas šalčiui tuo mažesnis, kuo daugiau klinkeryje C_3A .

Prognozuojant keramzitbetonio eksploatacinį atsparumą šalčiui plačiai taikomas bandinių skirstymas pagal ribinį 26 % efektyvaus poringumo rodiklį. Dėl medžiagų, kurios yra mažesnio efektyvaus poringumo (≤ 26 %) ir struktūros sudėtingumo nėra paprasta kurti sparčius eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozavimo metodus (Mačiulaitis 1996, 1997). Dėl to ši problema aktuali mažo efek-

tyvus poringumo betonams. Be to, pats efektyvus poringumo rodiklis W_E iki šiol nebuvo naudotas prognozuojant keramzitbetonio eksploatacinį atsparumą šalčiui.

Pagal pateiktas formules (1.1 lentelė) buvo apskaičiuoti (3.2 lentelė) keramzitbetonio bandinių efektyvus poringumas, bendrasis atviras poringumas, poringos erdvės rezervas, struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis, kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis šaldymo kryptimi, kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptimi, kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi bei vandens įmirkis ir, panaudojus prognozavimo lygtis (Mačiulaitis 1996, 1997), apskaičiuotas bandinių eksploatacinis atsparumas šalčiui sąlyginiais ciklais.

Poringos erdvės rezervas (R) charakterizuoja rezervinių porų ir kapiliarų skaičių, į kuriuos labai sunkiai įsiskverbia vanduo. Kuo didesnis poringos erdvės rezervas, tuo didesnis bus bandinių atsparumas šalčiui. Struktūros nevienalytiškumo laipsnis (N) leidžia įvertinti efektyviųjų kapiliarų struktūros netolygumą pagal jų ekvivalentinį ilgį. Kapiliariniai masės srauto greičiai (g_2 , G_1 , G_2) parodo kapiliarų ekvivalentinį skersmenį. Bendrojo atvirojo poringumo rodiklis (W_r) charakterizuoja visą atvirąją bandinio poringąją erdvę makrostruktūros ir mikrostruktūros aspektu.

3.2 lentelė. Keramzitbetonio struktūrinių rodiklių vidutinės vertės

Table 3.2. Average values of structural parameters of the expanded-clay lightweight concrete

Mišinio žymuo	G_1 , g/cm ²	G_2 , g/cm ²	D , %	R , %	N , vnt.	g_2 , g/cm ²
K0	0,24	0,25	1,62	58,29	1,74	0,21
K1	0,22	0,13	1,63	57,44	0,93	0,36
K2	0,17	0,17	1,65	55,43	1,82	0,20
K3	0,29	0,20	2,36	42,21	0,86	0,08
K4	0,15	0,13	1,63	49,53	1,83	0,10
K5	0,15	0,32	1,60	54,60	2,09	0,17
K6	0,16	0,15	1,77	45,89	1,33	0,12

Pastaba: G_1 – kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmenai šaldymo kryptiai, G_2 – kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi, D – sąlyginis porų ir kapiliarų sienelių storis, R – poringos erdvės rezervas, N – struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis, g_2 – kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis šaldymo kryptimi

Vidutinės struktūrinių rodiklių vertės pateiktos 3.2 lentelėje. Iš jos matyti, kad parinktuose keramzitbetonio bandiniuose kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi kito nuo 0,15 g/cm² (K4, K5 mišinys) iki 0,29 g/cm² (K3 mišinys), kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmenai šaldymo kryptiai kito nuo 0,13 g/cm² (K1, K4 mišinys) iki 0,32 g/cm² (K5 mišinys), są-

lyginis porų ir kapiliarų sienelių storis kito nuo 1,60 % (K5 mišinys) iki 2,36 % (K3 mišinys). Iš 3.2 lentelės duomenų pastebėta, kad mūsų tyrimuose keičiant KAT atliekos kiekį bandiniuose, poringos erdvės rezervo vertės kito nuo 42 % (K3 mišinys) iki 58 % (K0 mišinys), struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis kito nuo 1 vnt. (K1, K3 mišinys) iki 2 vnt. (K5 mišinys), kapiliarinis masės srauto greitis kito nuo 0,08 g/cm² (K3 mišinys) iki 0,36 g/cm² (K1 mišinys).

3.13 pav. Vidutinės efektyviojo ir bendrojo atviro poringumų vertės
Fig. 3.13. Average values of effective and total open porosity rates

Efektyviojo ir bendrojo atviro poringumų vidutinės vertės pateiktos 3.13 paveiksle. Efektyviojo poringumo vertės kito nuo 16 % (K0 bandinys) iki 20 % (K6 bandinys). Bendrojo atviro poringumo vertės kito nuo 30 % (K3 bandinys) iki 38 % (K0, K1, K2, K4 ir K5 bandiniai). Kai mišinyje panaudota 10 % KAT atliekos (K2 bandinys), bendrojo atviro poringumo vertės gaunamos mažesnės. Bandymais nustatyta, kad tiriamųjų keramzitbetonio bandinių vidutinis efektyvus poringumas buvo mažesnis už 26 %.

3.14 pav. Prognozuojamas eksploatacinis atsparumas šalčiui pagal suirimo pradžią ir pabaigą

Fig. 3.14. Forecasted exploitation frost resistance according to fragmentation beginning and end

Apskaičiuotas eksploatacinis atsparumas šalčiui sąlyginiais ciklais pateiktas 3.14 paveiksle. Eksploatacinis atsparumas šalčiui ciklais kito nuo 33 (K1 bandiniai) iki 230 (K3 bandiniai). Rezultatai rodo (3.14 pav.), kad kontrolinių bandinių surimo pabaiga – 100 ciklų, K1 bandinių suirimo pabaiga – 33 ciklai, K2 bandinių – 57 ciklai, K3 bandinių – 230 ciklų, K4 bandinių – 82 ciklai, padidinus KAT atliekos kiekį iki 20 % ir 30 % jų surimo pabaiga siekia atitinkamai 115 ir 80 ciklų. Jei palygintume kontrolinius K0 bandinius su K3 bandiniais, tai prognozuojamas eksploatacinis atsparumas šalčiui padidėjo 130 %. Su mažiausiu KAT atliekos kiekiu bandinių prognozuojamas eksploatacinis atsparumas šalčiui sumažėjo 67 %, palyginti su kontroliniais bandiniais.

3.5. Sukietėjusio keramzitbetonio mikrostruktūros tyrimai

Po 28 parų kietėjimo ištyrus skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu keramzito granulės ir skiedinio dalies kontakto vietą matyti (3.15 pav.), kad keramzito granulė yra visu savo paviršiumi sukibusi su naujai susiformavusios cemento akmenis mase, didžiosios paviršinės keramzito poros yra užpildytos skiedinio dalies mineralais.

Visai kitaip yra sukibę smėlio grūdėliai su cemento akmeniu, smėlis tokiomis standartinėmis kietėjimo sąlygomis savo paviršiuje nesudaro stiprių ryšių. Kontakto zonoje esanti smėlio ir skiedinio dalis pirmiausia atitrūksta nuo smėlio grūdėlio paviršiaus. Norint sustiprinti šių medžiagų kontaktą, reikėtų sudaryti hidrotermines kietėjimo sąlygas (autoklave), ir mechanškai aktyvavus paviršių smėlis sudarytų cheminius ryšius skiedinio dalyje.

Skiedinio dalis – tai poringas kūnas, kuriame didžiąją kietosios fazės dalį sudaro koloidinio dispersiškumo mikrokristalai, galintys surišti didelį kiekį vandens. Jis sudarytas iš įvairių hidrosilikatų, hidroaluminatų, portlandito kristalų, kapiliarinių porų. Skiedinio dalyje esančias poras galima suskirstyti į kapiliarines, gelio ir oro poras. Oro poros susidaro į betono mišinį patenkant oro, jos būna uždarnos ir dažniausia sferinės formos.

Keramzitbetonio bandinių cemento ankstyvojo kietėjimo etape (kietėjus 14 parų) skiedinio dalies mikrostruktūros vaizdas pateiktas 3.16 paveiksle.

Norint ištirti, kokios poros vyrauja keramzitbetonio K3 ir K4 bandiniuose po 28 parų kietėjimo, skiedinio dalies vaizdas buvo padidintas elektroniniu mikroskopu 2000 kartų (3.17 pav., a, b). 3.17 paveiksle labai aiškiai parodytos kapiliarinės poros (siauri kanalai) ir oro poros (sferinės formos). Sąlyginis oro porų ir kapiliarų sienelių storis yra didesnis bandiniuose su 10 % KAT atliekos (3.17 pav. a).

3.15 pav. Kontrolinių bandinių kontakto zonos tarp keramzito granulės ir skiedinio dalies mikrostruktūros vaizdas: 1 – skiedinio dalis; 2 – keramzito granulė; a – $\times 260$; b – $\times 200$

Fig. 3.15. Reference samples' microstructure view of the contact area between granule of expanded-clay and grout part: 1 – grout part; 2 – granule of expanded-clay; a – $\times 260$; b – $\times 200$

3.16 pav. Keramzitbetonio bandinių skiedinio dalies mikrostruktūros vaizdas: a – bandiniai su 3 % KAT atliekos ($\times 4070$); b – bandiniai su 5 % KAT atliekos ($\times 4150$)

Fig. 3.16. Microstructure view of the grout part of the samples of expanded-clay lightweight concrete: a – samples with 3 % of CAT ($\times 4070$); b – samples with 5 % of CAT ($\times 4150$)

Elektroniniu mikroskopu buvo padidintas keramzitbetonio K5 ir K6 bandinių, kietėjusių 28 paras, skiedinio dalies vaizdas (3.18 pav., a, b).

3.17 pav. Keramzitbetonio bandinių skiedinio dalies mikrostruktūros vaizdas: 1 – oro poros; 2 – kapiliarinės poros; a – bandiniai su 10 % KAT atliekos ($\times 2000$); b – bandiniai su 15 % KAT atliekos ($\times 2000$)

Fig. 3.17. Microstructure view of the grout part of the samples of expanded-clay lightweight concrete: 1 – air pores; 2 – capillary pores; a – samples with 10 % of CAT ($\times 2000$); b – samples with 15 % of CAT ($\times 2000$)

3.18 pav. Keramzitbetonio bandinių skiedinio dalies mikrostruktūros vaizdas: 1 – oro poros; 2 – kapiliarinės poros; a – bandiniai su 20 % KAT atliekos ($\times 2000$); b – bandiniai su 30 % KAT atliekos ($\times 2000$)

Fig. 3.18. Microstructure view of the grout part of the samples of expanded-clay lightweight concrete: 1 – air pores; 2 – capillary pores; a – samples with 20 % of CAT ($\times 2000$); b – samples with 30 % of CAT ($\times 2000$)

Bendrojo atvirojo poringumo rodiklis charakterizuoja visą atvirąją bandinio poringąją erdvę makrostruktūros ir mikrostruktūros aspektu. Visų tiriamųjų par-

tijų šis rodiklis gana mažai skiriasi. Nedidelis bendrojo poringumo skirtumas matyti tik bandiniuose, kuriuose yra 10 % ir 30 % KAT atliekų, ir tai sutampa su informacija, pateikta 3.13 paveiksle.

Pagal struktūros nevienalytiškumo laipsnį galima įvertinti efektyviųjų porų ir kapiliarų struktūros netolygumą jų ekvivalentinio ilgio atžvilgiu (2.1 lentelė ir 3.2 lentelė). Galime teigti, kad tolygi struktūra susidaro K1 ir K3 bandiniuose, į kuriuos įdėtas mažesnis KAT atliekos kiekis (3.16 pav., a; 3.17 pav., a; 3.2 lentelė).

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atliktų tyrimų metu tankio ir stiprio atžvilgiu geriausias nemalto katalizatoriaus atliekos kiekis yra 10 % cemento masės. Esant 10 % katalizatoriaus kiekiui keramzitbetonio vidutinės gniuždymo stiprio vertės 18,9 MPa, vidutinis tankis 1371 kg/m^3 , o šilumos laidumo koeficiento vidutinė vertė $0,455 \text{ W/mK}$.
2. Atlikus rentgenografinę analizę, nustatyta, kad keramzitbetonio bandiniuose be tradicinių naujadarų, kurių yra kontroliniuose ir bandiniuose su priedu, susidaro etringitas, kai mišinyje panaudota 3 % ir 5 % katalizatoriaus atliekos. Taip pat randama nehidratuotų alito kristalų, kai katalizatoriaus atliekos yra 3 %, 5 % ir 15 %, o esant jos 15 % – ir gipso.
3. Atlikus keramzitbetonio mišinių egzotermio efekto tyrimus galima teigti, kad didinant katalizatoriaus atliekos kiekį iki 10 % sumažėja maksimalios temperatūros pasiekimo trukmė. Tai rodo, kad atliekos priedas spartina cemento mineralų hidratacijos procesą. Tačiau tai vyksta esant pakankamam vandens kiekiui, o vandens poreikio rodiklis rodo jo perteklių tik iki atliekos geriausios koncentracijos imtinai.
4. Didžiausias prognozuojamas eksploatacinis atsparumas šalčiui yra bandinių su geriausiu 10 % katalizatoriaus atliekos kiekiu ir lygus 230 sąlyginių ciklų pagal suirimo pabaigą, t. y. sudaro 130 %, palyginti su kontroliniais bandiniais.

Keramzitbetonio su mulitinės vatos atlieka tyrimų rezultatai

Šiame darbo skyriuje pateikti keramzitbetonio bandinių, kurių formavimo masė susideda iš: CEM II/A-L 42,5 N klinties portlandcemenčio, 2/4 frakcijos keramzito smėlio, 0/4 frakcijos natūralaus smėlio ir aktyvaus mineralinio priedo – nedegtos mulitinės vatos (MV) atliekos, tyrimo rezultatai.

4.1. Betono bandinių pagrindinės fizikinės ir mechaninės charakteristikos

Tyrimų rezultatai rodo (4.1 pav.), kad maišant keramzitbetonį su skirtingo kiekio MV atlieka bandinių tankis kinta nuo 1123 iki 1455 kg/m³.

Eksperimentinių tyrimų metu išmatuoti vidutiniai tankio didžiai svyruoja gana plačiai: vidutinis MV0 bandinių tankis siekia 1455 kg/m³, MV1 bandinių – 1349 kg/m³, MV2 bandinių – 1407 kg/m³, MV3 bandinių – 1188 kg/m³, MV4 bandinių – 1123 kg/m³.

Iš 4.1 paveikslo matyti, kad, panaudojus 10 % MV atliekos, bandinių tankis sumažėjo 3,3 %, t. y. mažiausiai, palyginus su kontroliniais bandiniais. Nustatyta, kad kuo daugiau įdedama MV atliekos (15 % ir 20 %), tuo labiau sumažėja

bandinių tankis: atitinkamai 18,4 % ir 22,8 %, palyginus su kontroliniais bandiniais.

4.1 pav. Keramzitbetonio bandinių su MV atlieka vidutinės tankio vertės: MV0 – be atliekos; MV1 – su 5 % atliekos; MV2 – su 10 % atliekos; MV3 – su 15 % atliekos; MV4 – su 20 % atliekos

Fig. 4.1. Average density values of the expanded-clay lightweight concrete samples with MW waste: MW0 – without waste; MW1 – with 5 % of waste; MW2 – with 10 % of waste; MW3 – with 15 % of waste; MW4 – with 20 % of waste

Buvo nustatytas ir keramzitbetonio bandinių gniuždymo stipris po 2, 14 ir 28 kietėjimo parų. Skirtingą trukmę kietėjusių bandinių vidutinės gniuždymo stiprio vertės parodytos 4.2 paveiksle.

4.2 pav. Keramzitbetonio bandinių su MV atlieka vidutinės gniuždymo stiprio vertės: MV0 – be atliekos; MV1 – su 5 % atliekos; MV2 – su 10 % atliekos; MV3 – su 15 % atliekos; MV4 – su 20 % atliekos

Fig. 4.2. Average compressive strength values of the expanded-clay lightweight concrete samples with MW waste: MW0 – without waste; MW1 – with 5 % of waste; MW2 – with 10 % of waste; MW3 – with 15 % of waste; MW4 – with 20 % of waste

Rezultatai rodo, kad kontrolinio mišinio bandinių, kietėjusių dvi paras, vidutinis gniuždymo stipris yra 9,5 MPa, kietėjusių keturiolika parų – 17,1 MPa. Bandinių su 5 % MV atliekos vidutinis gniuždymo stipris po dviejų ir keturiolikos kietėjimo parų atitinkamai 4,0 MPa ir 11,0 MPa. Iš pateiktų reikšmių bandinių su atlieka didžiausiu ankstyvuoju gniuždymo stipriu (7,7 ir 13,7 MPa) pasižymi bandiniai, kuriuose yra 10 % atliekos (MV2 mišinys). Nustatyta, kad gniuždymo stipris, kai formavimo mišinyje buvo 10 % atliekos, sumažėjo 13,9 %, palyginti su kontroliniais bandiniais. Gerokai mažesnės gniuždymo stiprio rodiklių vertės gautos sugniuždžius bandinius, pagamintus iš MV3 ir MV4 masės mišinių, kuriuose buvo naudotas didesnis MV atliekos kiekis (15 % ir 20 %), atitinkamai po dviejų parų kietėjimo gniuždymo stipris pasiekė 1,4 MPa ir 1,1 MPa, po keturiolikos parų kietėjimo – 4,1 MPa ir 3,7 MPa vertės.

Tolesnių tyrimų rezultatai rodo, kad iš kontrolinio mišinio bandinių vidutinis gniuždymo stipris po 28 parų kietėjimo yra 19,5 MPa. Keramzitbetonyje dalį cemento pakeitus MV atlieka, vidutiniai gniuždymo stiprio rezultatai svyruoja gana plačiai: mažiausias vidutinis bandinių gniuždymo stipris siekia 4,5 MPa (mišinys MV4), o didžiausias – 16,8 MPa (mišinys MV2).

Didelę neigiamą įtaką bandinių stipriui turi didesni atliekos kiekiai. Į formavimo mišinį įdėjus 20 % atliekos bandinių gniuždymo stipris labai sumažėja, o gaunamas cemento akmens karkasas nėra stiprus. Susiformavę kristalai struktūroje nesurišti stipriais ryšiais, nes bandinių tankis labai sumažėja. Be to, ši susiformavusi struktūra įgeria didelį kiekį vandens, kuris siekia 33 %.

Sumaišius keramzitbetonio mišinius su 15 % MV atliekos, vidutinis bandinių stipris ir tankis mažėja, tačiau matomas analogiškas variantas, kaip ir bandinių su 20 % MV atliekos, kai bandinių gniuždymo stiprio ir tankio vertės vis mažėja.

Perskaičiuotosios vidutinės gniuždymo stiprio vertės (pasirinktasis tankis $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$) pateiktos 4.3 paveiksle. Kaip matyti, keičiant MV atliekos kiekį perskaičiuotasis bandinių gniuždymo stipris, esant vienodam tankiui, po dviejų kietėjimo parų kinta nuo 6,9 iki 1,0 MPa, po 14 kietėjimo parų kinta nuo 12,5 iki 3,1 MPa, o po 28 parų – nuo 13,9 MPa iki 3,8 MPa.

4.4 paveiksle pavaizduotas sugniuždytas keramzitbetonio bandinys, kietėjęs 28 paras, pagamintas iš mišinio, kurio žymuo MV4. Matoma, kad 28 paras kietėjusio cemento akmens stipris yra mažesnis nei keramzito granulių stipris ir gniuždymo metu suirimas vyksta per cemento akmenį.

Nustatytas keramzitbetonio bandinių šilumos laidumo koeficientas. Mažesnis lengvųjų betonų šilumos laidumo koeficientas gaunamas tada, kai betono mišinyje naudojamas maksimalus poringųjų užpildų kiekis, esant minimaliam cemento kiekiui, ypač nenaudojant kvarcinio smėlio (Грызлов 1992).

4.3 pav. Keramzitbetonio bandinių su MV atlieka perskaičiuotieji vidutinės gniuždymo stiprio vertės: MV0 – be atliekos; MV1 – su 5 % atliekos; MV2 – su 10 % atliekos; MV3 – su 15 % atliekos; MV4 – su 20 % atliekos

Fig. 4.3. Recalculated average compressive strength values of the expanded-clay lightweight concrete samples with MW waste: MW0 – without waste; MW1 – with 5 % of waste; MW2 – with 10 % of waste; MW3 – with 15 % of waste; MW4 – with 20 % of waste

4.4 pav. Bandinio vaizdas po gniuždymo

Fig. 4.4. View of the sample after the compression

Atlikti tyrimų rezultatai parodė, kad vidutinio tankio (1455 kg/m^3) kontrolinių bandinių MV0 šilumos laidumo koeficiento vidutinė vertė yra $0,490 \text{ W/mK}$.

Čia buvo galima daryti prielaidą, kad MV plaušinės atliekos įterpimas į keramzitbetonio mišinį mažins (ypač didesni kiekiai) šilumos laidumo koeficiento vertes. Ir tai pasitvirtino. MV3 bandinių atveju vidutinis tankis buvo 1188 kg/m^3 , o šilumos laidumo koeficiento vidutinė vertė pasiekė $0,355 \text{ W/mK}$. Keramzitbetonio su MV priedais naudojimo kryptis: termoizoliaciniai konstrukciniai gaminiai.

Siekiant nustatyti keramzitbetonio bandinių MV priedo (x) sąryšio su tiriamais rodikliais, t. y. tankiu (y_1), vandens įmirkio (y_2) ir gniuždymo stipriu (y_3), dėsningumus, buvo atlikta duomenų statistinė ir regresinė analizės bei sudarytos empirinės lygtys. Visų keramzitbetonio mišinių, panaudojus MV priedą, fizikinių ir mechaninių rodiklių priklausomybei nustatyti sudarytos empirinės lygtys pateiktos 4.1 lentelėje. Sudarytų empirinių lygčių statistiniai rodikliai pateikti 4.2 lentelėje.

4.1 lentelė. Keramzitbetonio fizikinių ir mechaninių rodiklių nuo MV priedo kiekio empirinės lygtys

Table 4.1. Empirical equations between physical and mechanical parameters of expanded-clay lightweight concrete and the amount of MW additive

Lygtis	Savybė	Empirinė lygtis
4.1	Tankis y_1	$y_1 = 1469,3 - 3,925x$
4.2	Vandens įmirkis y_2	$y_2 = 9,149 + 0,234x$
4.3	Gniuždymo stipris y_3	$y_3 = 19,39 - 0,182x$

4.2 lentelė. (4.1)–(4.3) empirinių lygčių daugialypiai koreliacijos R ir determinacijos R^2 koeficientai, vidutinio standartinio nuokrypio S_e bei Stjudento kriterijaus vertės

Table 4.2. (4.1)–(4.3) multiple correlation R and determination ratios R^2 of empirical equations, average values S_e of standard deviation as well as student's criteria value

Lygtis	Rodikliai	R	R^2	S_e	Stjudento kriterijaus reikšmė
4.1	Tankis y_1	0,911	0,831	$54,9 \text{ kg/m}^3$	10,60
4.2	Vandens įmirkis y_2	0,864	0,746	4,23 %	8,22
4.3	Gniuždymo stipris y_3	0,882	0,777	3,02 MPa	8,96

(4.1), (4.2) ir (4.3) empirinės lygtys patvirtino tyrimo metu gautus rezultatus, kad didėjant keramzitbetonio mišinyje MV atliekos kiekiui, mažėja bandinių tankis, didėja vandens įmirkis ir sumažėja bandinių gniuždymo stipris.

Iš 4.2 lentelės matyti, kad tarp tiriamų rodyklių yra stiprus tiesinis ryšys, nes gautų empirinių lygčių daugiausiai koreliacijos koeficientai $R = 0,882\text{--}0,911$ artėja prie vieneto. Apskaičiuoti lygčių determinacijos koeficientai $R^2 = 0,746\text{--}0,831$ didesni už 0,5, todėl galima teigti, kad parinktas matematinis modelis gerai atspindi eksperimentinių duomenų pasiskirstymo pobūdį. Iš gautų (4.1), (4.2) ir (4.3) lygčių Stjudento kriterijaus reikšmių išeina, kad keramzitbetonio mišinyje MV atliekos kiekis daro didžiausią poveikį bandinių tankiui. Kuo didesnis bus MV atliekos kiekis mišinyje, tuo bandinių tankis ir gniuždymo stipris bus mažesnis, o vandens įmirkis – didesnis.

4.2. Rentgenografiniai betono bandinių rezultatai

Aktyvioji betono struktūros dalis yra cemento akmuo, nuo kurio struktūros formavimosi kinetikos, susidariusių naujų savybių ir kiekio daugiausia priklauso ir paties betono savybės. Cemento akmens struktūros formavimasis prasideda nuo cemento teslos struktūros, kuri dėl joje vykstančių fizikinių-cheminių procesų bei jų metu susidariusių produktų – naujų kiekybinių pokyčių tampa kietuoju kūnu, sujungiančiu užpildus į monolitą (Gumuliauskas, Skripkiūnas 1997).

Prieš aptariant konkrečius rentgenografinių tyrimų rezultatus reikia pabrėžti, kad ir anksčiau tyrimams naudotas vandens ir rišiklio (cemento ir mulitines vatos) santykis buvo apie 0,52. Tačiau ir dabar jo nekeičiant ir išlaikant tą pačią mišinių reologiją (S1) gerokai sumažintas tiek absoliutus vandens, tiek rišamosios medžiagos kiekis (2.3 lentelė). Todėl buvo galima prognozuoti bendrą vandens trūkumą visų pirma dėl absorbcinių keramzito poreikių.

Nagrinėdami kontrolinių bandinių rentgenogramas (4.5 pav.), rasti šie mineralai: portlanditas P (0,490, 0,263, 0,193 nm), kvarcas Q (0,425, 0,335, 0,245, 0,228, 0,224, 0,213, 0,198, 0,182 nm), kalcitas K (0,385, 0,304, 0,254, 0,249, 0,228, 0,209, 0,191, 0,187 nm), dolomitas D (0,289, 0,219 nm), lauko špatai L (0,403, 0,324, 0,319 nm) ir nesureagavęs portlandcemenčio mineralas alitas C_3S (0,277, 0,275 nm). Iš rentgenogramoje pateiktų duomenų matyti, kad bandiniuose aptinkami nehidratuoto alito pėdsakai, o tai jau rodo vandens trūkumą. Tačiau nehidratuotas C_3S nedaro poveikio keramzitbetonio bandinių gniuždymo stipriui ir jis siekia 19,5 MPa, nes bandiniuose yra susidaręs didelis portlandito kiekis.

Kitoks mineralų susidarymas pastebimas bandinių rentgenogramose, kai panaudojama MV atlieka. Kaip jau buvo minėta, darbe tiriamas bandinius sudaranti skiedinio dalis, kuri buvo kruopščiai atskiriama nuo keramzito. Keramzitbetonio bandinių, kurių formavimo mišinyje buvo 5 % MV atliekos (MV1) ir 10 % (MV2), rentgenogramos pateiktos 4.6, 4.7 paveiksluose.

4.5 pav. Kontrolinių keramzitbetonio skiedinio dalies bandinių rentgenograma:

P – portlanditas; Q – kvarcas; L – lauko špatai; K – kalcitas; D – dolomitas;
CS – alitas (C_3S)

Fig. 4.5. X-ray pattern of the grout part of expanded-clay lightweight concrete of reference samples: P – portlandite; Q – silica; L – feldspars; K – calcite; D – dolomite; CS – alite (C_3S)

Iš 4.6 paveiksle, kuriame pateikta bandinių, kurių mišinyje buvo panaudota 5 % atliekos (MV1), rentgenograma, pastebėta, kad po 28 kietėjimo parų skiedinio dalyje yra susidarę tokie mineralai: etringitas E (0,980 nm), gipsas G (0,754 nm), portlanditas P (0,491, 0,263, 0,193, 0,180 nm), kvarcas Q (0,426, 0,335, 0,245, 0,228, 0,224, 0,213, 0,198, 0,182 nm), kalcitas K (0,385, 0,304, 0,249, 0,228, 0,209, 0,191, 0,187 nm), dolomitas D (0,288, 0,219, 0,202 nm) ir lauko špatų L (0,325, 0,320, 0,318 nm).

Lyginant šias rentgenogramas didžiausias matomas skirtumas tas, kad keramzitbetonyje su 5 % atliekos (MV1) susidaro junginiai, kurių keramzitbetonyje be atliekos (MV0) mes neaptikome – tai etringito ir gipso difrakcinės smailės. Etringitas suriša vandenį, o tai sukelia medžiagos tūrio didėjimą. Kristalizacinis vanduo etringite žalingas betonams, nes gali ardyti gaminį arba sukelti jame įtrūkių. Iš šio tyrimo rezultatų ir gaunamos mažesnės gniuždymo stiprio vertės (skiedinio dalyje yra etringitas ir gipsas). Gniuždymo stipris, kai formavimo mišinyje buvo 5 % atliekos, sumažėjo 32,8 %, palyginti su kontroliniais bandiniais.

Iš 4.7 paveiksle, kuriame pateikta rentgenograma su 10 % atliekos (MV2), pastebėta, kad susidarę tokie mineralai: gipsas G (0,811, 0,756) nm, portlanditas P (0,491, 0,263, 0,198, 0,193) nm, kvarcas Q (0,426, 0,335, 0,246, 0,228, 0,224, 0,213, 0,182) nm, kalcitas K (0,385, 0,304, 0,243, 0,228, 0,209, 0,191, 0,187) nm, dolomitas D (0,289, 0,280, 0,180) nm ir lauko špatai L (0,403, 0,325, 0,320, 0,219, 0,216) nm. Kadangi skiedinio dalyje nėra etringito, o tik gipsas, gniuždymo stiprio vertė bandiniuose sumažėjo 13,9 %, palyginti su kontroliniais

bandiniais. Nors gipso susidarymas yra svarbus, nėra aiškių įrodymų, kad vien dėl jo betonai pradeda greičiau irti (Brown, Badger 2000).

4.6 pav. Keramzitbetonio skiedinio dalies su 5 % mulitinės vatos atliekos priedu rentgenograma: E – etringitas; G – gipsas; P – portlanditas; Q – kvarcas; K – kalcitas; L – lauko špatai; D – dolomitas

Fig. 4.6. X-ray pattern of expanded-clay lightweight concrete grout part with 5 % of mullite wool waste additive: E – ettringite; G – gypsum; P – portlandite; Q – silica; K – calcite; L – feldspar; D – dolomite

Pagal keramzitbetonio rentgenografinę analizę, pateiktą 4.8 paveiksle, pastebėta, kad šios sudėties (MV3 mišinys, kuriame 15 % atliekos) skiedinio dalį sudarantys mineralai yra tokie: etringitas E (0,970 nm), gipsas G (0,756 nm), portlanditas P (0,491, 0,263, 0,193) nm, kvarcas Q (0,426, 0,335, 0,246, 0,228, 0,224, 0,213, 0,198, 0,182 nm), kalcitas K (0,385, 0,304, 0,249, 0,228, 0,209, 0,191, 0,187 nm), dolomitas D (0,289 nm) ir lauko špatai L (0,403, 0,325, 0,320 nm). Rasti ir nehidratuoti C_3S kristalai, tai patvirtina difrakcinė smailė (0,278 nm). Palyginus su kontroliniais bandiniais šių bandinių gniuždymo stiprio vertė sumažėjo 75,4 %.

Keramzitbetonio bandinių su 20 % atliekos (MV4) (4.9 pav.), identifikuoti mineralai yra šie: ilitas J (0,908 nm), portlanditas P (0,491 nm), gipsas G (0,812, 0,756 nm), kvarcas Q (0,426, 0,335, 0,246, 0,228, 0,221, 0,213, 0,198, 0,182 nm), kalcitas K (0,386, 0,304, 0,249, 0,228, 0,209, 0,193, 0,191, 0,187 nm), dolomitas D (0,370, 0,289, 0,270, 0,254, 0,240, 0,219, 0,202, 0,187, 0,179 nm) ir lauko špatai L (0,325, 0,319 nm) ir nehidratuotas C_3S kristalas (0,276 nm). Ilito pėdsakai gali būti aiškinami tuo, kad skiedinio dalyje pasiliko keramzito, bet tai nedaro esminės įtakos šio bandymo rezultatui.

Molio mineralai skirstomi į keturias pagrindines grupes: kaolinitas, montmorilonitas/smetitas, ilitas ir chloritų grupės (Østnor 2007). Labiausiai paplitęs molio grupės mineralas yra ilitas. Jo kristalinė gardelė panaši į montmorilonito,

tik joje yra šarminių ir žemės šarminių metalų jonų, be to, dalis silicio katijonų yra izomorfiškai pakeisti aliuminio jonais (Balandis *et al.* 1995).

4.7 pav. Keramzitbetonio skiedinio dalies su 10 % mulitinės vatos atliekos priedu rentgenograma: G – gipsas; P – portlanditas; Q – kvarcas; L – lauko špatai; K – kalcitas; D – dolomitas

Fig. 4.7. X-ray pattern of expanded-clay lightweight concrete grout part with 10 % of mullite wool waste additive: G – gypsum; P – portlandite; Q – silica; L – feldspars; K – calcite; D – dolomite

4.8 pav. Keramzitbetonio skiedinio dalies su 15 % mulitinės vatos atliekos priedu rentgenograma: E – etringitas; G – gipsas; P – portlanditas; Q – kvarcas; K – kalcitas; D – dolomitas; L – lauko špatai; CS – alitas (C_3S)

Fig. 4.8. X-ray pattern of expanded-clay lightweight concrete grout part with 15 % of mullite wool waste additive: E – ettringite; G – gypsum; P – portlandite; Q – silica; K – calcite; D – dolomite; L – feldspars; CS – alite (C_3S)

4.9 pav. Keramzitbetonio skiedinio dalies su 20 % mulitinės vatos atliekos priedu rentgenograma: J – ilitas; G – gipsas; P – portlanditas; Q – kvarcas; K – kalcitas; D – dolomitas; L – lauko špatai; CS – alitas (C_3S)

Fig. 4.9. X-ray pattern of expanded-clay lightweight concrete grout part with 20 % of mullite wool waste additive: J – illite; G – gypsum; P – portlandite; Q – silica; K – calcite; D – dolomite; L – feldspars; CS – alite (C_3S)

Bandinių labai mažą stiprį galima paaiškinti ir tuo, kad šios sudėties keramzitbetonio skiedinio dalyje susidaręs didesnis gipso kiekis, kuris ir lėmė bandinių gniuždymo stiprio reikšmių, lyginant su kontroliniais bandiniais, sumažėjimą, o t. y. – 76,9 %. Struktūriniai rodikliai patvirtina, lyginant su kontroliniais bandiniais rodikliais, kad yra padidėjęs kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis, bendrasis atviras ir efektyvusis poringumas ir sumažėjęs sąlyginis porų bei kapiliarų sienelių storis (4.4 lentelė).

Apibendrinant keramzitbetonio bandinių rentgenografinius tyrimus, galima teigti, kad nedegtos mulitinės vatos atlieka nesumažina susidarancio portlandito kiekio. Iš visų tirtų keramzitbetonio bandinių išsiskiria mišinys, kuriame yra 10 % atliekos. Per 28 kietėjimo paras šiame mišinyje sureagavo visas alitas ir jame nėra etringito. Tačiau vandens trūkumas mišiniuose neabejotinai turi bendrą neigiamą poveikį hidratacijos ir keramzitbetonio su MV plaušiniu priedu kietėjimo procesams.

4.3. Mišinių egzoterminio efekto tyrimai

Nustatant egzotermijos efektus buvo įvertintas nedegtos mulitinės vatos poveikis kietėjant keramzitbetonio mišiniui. Atlikti tyrimai parodė (4.10 pav.), kad kontrolinis keramzitbetonio mišinys (MV0) hidratacijos metu įkaito iki 29,31 °C, MV1 mišinys (kuriame buvo 5 % MV atliekos) įkaito iki 29,1 °C, o MV2 (kuriame buvo 10 % MV atliekos) iki 27,61 °C. Kontrolinis mišinys maksimalią

egzotermijos proceso temperatūrą pasiekė po 856 minučių, mišinys MV1 – po 900 minučių, o mišinys MV2 – po 903 minučių.

Gauti duomenys rodo, kad mišinio MV3 (su 15 % MV atliekos) aukščiausia hidratacijos temperatūra buvo 26,41 °C, o hidratacijos procesas maksimalią temperatūrą pasiekė po 933 minučių. Padidinus MV atliekos kiekį mišinyje iki 20 % MV4, maksimali portlandcemenčio hidratacijos proceso temperatūra buvo 24,82 °C, o maksimali temperatūra pasiekta po 1202 minučių.

4.10 paveiksle palyginus kontrolinio (MV0 mišinys) ir MV1 mišinio egzoterminio efekto tyrimų duomenis, matyti, kad hidratacijos proceso metu maksimali temperatūra, į mišinį įdėjus atliekos, pasiekama lėčiau, ši trukmė pailgėja 44 min. Padidinus atliekos kiekį iki 10 %, nustatyta, kad hidratacijos proceso maksimalios temperatūros pasiekimo trukmė yra ilgesnė už kontrolinio mišinio 47 min. Didinant MV atliekos kiekį mišinyje (4.10 pav.) hidratacijos procesas temperatūrų maksimumus pasiekia 77 min. lėčiau (mišinys MV3) ir 346 min. lėčiau (mišinys MV4) nei kontrolinis.

4.10 pav. Mišinių egzoterminio efekto tyrimų rezultatai: MV0 – keramzitbetonis be atliekos; MV1 – keramzitbetonis su 5 % atliekos; MV2 – keramzitbetonis su 10 % atliekos; MV3 – keramzitbetonis su 15 % atliekos; MV4 – keramzitbetonis su 20 % atliekos

Fig. 4.10. Results of the exothermic effect analysis of the mixtures: MW0 – expanded-clay lightweight concrete without waste material; MW1 – expanded-clay lightweight concrete with 5 % of waste; MW2 – expanded-clay lightweight concrete with 10 % of waste; MW3 – expanded-clay lightweight concrete with 15 % of waste; MW4 – expanded-clay lightweight concrete with 20 % of waste

Tyrimų rezultatai parodė, kad kuo didesnis nedeptos mulitinės vatos kiekis, tuo mažesnė mišinio egzotermijos temperatūra, o hidratacijos procesas sulėtėja greičiausiai dėl vandens trūkumo.

Geresni rezultatai buvo gauti, kai MV atlieka buvo sumalta iki miltelių pavidalo ir persijota per 0,014 mm sieta.

Trupinama ir smulkinama medžiaga pirmiausia pradeda irti per makro- ir mikrotrūkius. Smulkinamų dalelių stipris didėja, paprastai toks metodas taikomas siekiant pagaminti stipresnes medžiagas. Didinant medžiagų stiprį jas smulkinant tolesniuose etapuose daugiau suvartojama energijos joms disperguoti (Фролов 1982).

Optinės mikroskopijos tyrimai rodo (4.11 pav.), kaip atrodo MV atlieka po sumalimo ir persijojimo. Mulitinės vatos plaušeliai sutrumpėjo, atsirado daugiau apvalios formos dalelių. Pasitvirtino nuomonė (Strazdas 1985), kad mineralinis pluoštas nevienalytis. Jame, be plaušelių, visuomet būna 2–40 % mažų 0,1–30 mm skersmens karoliukų, pasitaiko ir kitokių tarpų: lydalo gabaliukų, žvynelių, dulkių.

4.11 pav. MV atliekos vaizdas: a – iki malimo ($\times 98$); b – po malimo ($\times 56$)

Fig. 4.11. View of MW waste: a – before the grinding ($\times 98$); b – after grinding ($\times 56$)

Temperatūros matavimai keramzitbartonio mišinių su 10 % MV atliekos miltelių ir plaušelių pavidalu rišimosi ir kietėjimo metu pateikti 4.12 paveiksle. Rezultatai rodo, kad kontrolinis keramzitbartonio mišinys (1 kreivė) hidratacijos metu įkaito iki 29,31 °C, mišinys, kuriame buvo 10 % MV maltos ir persijotos atliekos (2 kreivė), iki 29,18 °C, mišinys su 10 % MV atliekos (3 kreivė) – iki 27,61 °C. Kontrolinis mišinys maksimalią egzotermijos proceso temperatūrą pasiekė po 856 minučių, mišinys su 10 % MV atliekos miltelių pavidalu – po 863 minučių, o mišinys su 10 % MV atliekos plaušelių pavidalu – po 903 minučių.

4.12 pav. Mišinių egzoterminio efekto tyrimų rezultatai: 1 – kontrolinis keramzitbetonio mišinys; 2 – keramzitbetonis su 10 % MV atliekos (miltelių pavidalu); 3 – keramzitbetonis su 10 % MV atliekos (plaušelių pavidalu)

Fig. 4.12. Results of the exothermic effect analysis of the mixtures: 1 – reference mixture of expanded-clay lightweight concrete; 2 – expanded-clay lightweight concrete with 10 % MW waste (powder form); 3 – expanded-clay lightweight concrete with 10 % MW waste (string form)

Iš 4.12 paveiksle pateiktų kreivių, lyginant kontrolinio (1 kreivė) ir su 10 % MV atliekos (2 kreivė) mišinio egzoterminio efekto tyrimų duomenis, nustatyta, kad maksimali temperatūra pasiekama praktiškai vienodai, hidratacijos proceso metu maksimali temperatūra sumažėjo 0,13 °C ir tik 7 min. sulėtina hidratacijos procesą. Tad galima teigti, kad pakeitus cementą 10 % MV atlieka miltelių pavidalu tyrimo rezultatas gaunamas beveik toks pat kaip ir kontrolinio keramzitbetonio mišinio. MV miltelių pavidalu atlieka keramzitbetonyje praktiškai nesulėtina cemento hidratacijos proceso.

Vandens pareikalavimo m vertės po išlaikymo vandenyje atitinkamą laiką (2, 14, 28 paras), prieš nustatant stiprį, pateiktos 4.3 lentelėje. Gauti rezultatai rodo, kad MV1 ir MV2 bandinių vandens vertės yra neigiamosios, o tai reiškia jo trūkumą, lyginant su bandiniais, kuriuose nėra MV plaušinio priedo, viršijančio 10 %. Tas faktas patvirtina bendrą vandens poreikio trūkumą ir dėl to lėtėjantį naujų susidarymą didinant MV kiekį, t. y. lėtėjantį hidratacijos procesą dėl vandens stygiaus.

4.3 lentelė. Vandens poreikio lyginimas tarp kontrolinių ir tiriamųjų bandinių
Table 4.3. Comparison of water demand between reference and analysed samples

Mišinio žymuo	Po 2 parų kietėjimo	Po 14 parų kietėjimo	Po 28 parų kietėjimo
	masių skirtumas, %	masių skirtumas, %	masių skirtumas, %
MV1	-1,22	-4,01	-3,31
MV2	-2,07	-1,76	-1,76
MV3	8,54	7,49	7,59
MV4	7,48	7,10	6,75

MV3 ir MV4 bandinių, palyginti su kontroliniais, vandens vertės (4.3 lentelė) yra teigiamosios, o tai reiškia jo perteklių, lyginant su bandiniais, kuriuose MV plaušinio priedo yra mažiau nei 10 %.

Ir iš šių tyrimų rezultatų taip pat galima teigti, kad geriausios struktūros keramzitbetonis susidarytų, palyginti su kontroliniais, kai vandens poreikio rodiklio vertė m teoriškai būtų lygi nuliui. Mulitinės vatos koncentracijos aspektu tai būtų 10–15 %.

4.4. Betono bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal pagrindinius ir išvestinius struktūros rodiklius

Vidutinės struktūrinių rodiklių vertės pateiktos 4.4 lentelėje. Iš 4.4 lentelės matyti, kad keramzitbetonio bandiniuose kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi kito nuo $0,13 \text{ g/cm}^2$ (MV0 mišinys) iki $1,05 \text{ g/cm}^2$ (MV4 mišinys), kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptčiai kito nuo $0,15 \text{ g/cm}^2$ (MV0 mišinys) iki $1,18 \text{ g/cm}^2$ (MV4 mišinys) bei sąlyginis porų ir kapiliarų sienelių storis kito nuo 0,98 % (MV4 mišinys) iki 2,03 % (MV0 mišinys). Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad keičiant MV atliekos kiekį bandiniuose, poringos erdvės rezervo vertės kito nuo 40 % (MV3 mišinys) iki 51 % (MV2 mišinys), struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis kito nuo 0,83 vnt. (MV0 mišinys) iki 2,23 vnt. (MV4 mišinys), kapiliarinis masės srauto greitis kito nuo $0,06 \text{ g/cm}^2$ (MV0 mišinys) iki $1,26 \text{ g/cm}^2$ (MV4 mišinys).

Efektyviojo ir bendrojo atviro poringumo vidutinės vertės parodytos (4.13 pav.). Efektyviojo poringumo vertės kito nuo 16,5 % (MV0 mišinys) iki 37,6 % (MV4 mišinys). Bendrojo atviro poringumo vertės kito nuo 32,5 % (MV0 mišinys) iki 50,9 % (MV4 mišinys).

Iš 4.14 paveikslą matyti, kad kontrolinių keramzitbetonio bandinių gautas didžiausias prognozuojamas eksploatacinis atsparumas šalčiui, kuris siekia

195 sąlyginių ciklų (pagal suirimo pabaigą). Tai daugiausia lemia didelis bandinių tankis (1455 kg/m^3) ir didelis poringos erdvės rezervas.

4.4 lentelė. Keramzitbetonio struktūrinių rodiklių vidutinės vertės

Table 4.4. Average values of structural parameters of the expanded-clay lightweight concrete

Mišinio žymuo	G_1 , g/cm^2	G_2 , g/cm^2	D , %	R , %	N , vnt.	g_2 , g/cm^2
MV0	0,13	0,15	2,03	49,08	0,83	0,06
MV1	0,16	0,26	1,52	45,09	1,28	0,26
MV2	0,22	0,27	1,92	50,88	1,76	0,30
MV3	0,30	0,64	1,28	39,99	1,62	0,49
MV4	1,05	1,18	0,98	26,05	2,23	1,26

Pastaba: G_1 – kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptiai, G_2 – kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi, D – sąlyginis porų ir kapiliarų sienelių storis, R – poringos erdvės rezervas, N – struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis, g_2 – kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis šaldymo kryptimi

4.13 pav. Vidutinės efektyviojo ir bendrojo atviro poringumo vertės

Fig. 4.13. Average values of effective and total open porosity rates

Mišinyje, kuriame yra 10 % MV atliekos (MV2 mišinys), eksploatacinis atsparumas šalčiui siekia 64 sąlyginius ciklus (pagal suirimo pabaigą). Tačiau palyginus MV2 bandinius su kontroliniais (MV0 bandiniai) sąlyginiai ciklai sumažėjo 67 %. Didėjant atliekos kiekiui šie rodikliai mažėja, atitinkamai gaunamas mažesnis prognozuojamas atsparumas šalčiui. Gauti keramzitbetonio bandiniai (MV3 ir MV4) yra lengvesni, tačiau juose yra daugiau porų ir tuštumų, kurios ir lemia didesnę bandinių įmirkį, o šios poros ir tuštumos susijungusios kapiliarais, o susidaręs poringos erdvės rezervas yra mažesnis. Taip pat mažėja sienelių storis, o didėja struktūros nevienalytiškumas. Nors kapiliarinis masės srauto greitis

ir auga didinant MV atliekos kiekį keramzitbartonyje, tačiau prognozuojamas atsparumas šalčiui, lyginant su kontroliniu bandiniu, tendencingai mažėja.

4.14 pav. Prognozuojamas eksploatacinis atsparumas šalčiui pagal suirimo pradžią ir pabaigą

Fig. 4.14. Forecasted exploitation frost resistance according to fragmentation beginning and end

Nagrinėjant bandinių fizikinių ir mechaninių bei struktūrinių rodiklių vertes, pastebima, kad geriausias nedegtos mulitinės vatos atliekų kiekis yra apie 10 %. Tačiau šie gaminiai galėtų būti naudojami ten, kur nereikalingas jų didesnis eksploatacinis atsparumas šalčiui.

Siekiant nustatyti MV priedo (x) priklausomybes nuo poringos erdvės rezervo (y_1) ir kapiliarinio masės srauto greičio (y_2), atlikti daugialypės regresijos skaičiavimai ir sudarytos empirinės lygtys. Gautos priklausomybės empirinės lygtys pateiktos 4.5 lentelėje, o jų statistiniai rodikliai – 4.6 lentelėje.

(4.1) ir (4.2) empirinės lygtys patvirtino tyrimo metu gautus rezultatus, kad didėjant keramzitbartonio mišinyje MV atliekos kiekiui, mažėja poringos erdvės rezervas, o didėja kapiliarinis masės srauto greitis.

4.5 lentelė. Struktūrinių rodiklių priklausomybės nuo MV priedo kiekio empirinės lygtys
Table 4.5. Empirical equations of the relation between structural parameters and the amount of MW additive

Lygtis	Parametras	Empirinė lygtis
4.1	Poringos erdvės rezervas y_1	$y_1 = 52,45 - 0,244x$
4.2	Kapiliarinis masės srauto greitis y_2	$y_2 = -0,054 + 0,013x$

Iš 4.5 lentelės matyti, kad tarp tiriamų rodyklių yra gana stiprus tiesinis ryšys, nes gautų empirinių lygčių daugialypiai koreliacijos koeficientai $R = 0,803\text{--}0,892$ artėja prie vieneto. Apskaičiuoti lygčių determinacijos koeficientai $R^2 = 0,644\text{--}0,795$ didesni už 0,5, todėl galima teigti, kad parinktas matematinis modelis gerai atspindi eksperimentinių duomenų pasiskirstymo pobūdį.

4.6 lentelė. (4.1) ir (4.2) empirinių lygčių daugialypiai koreliacijos R ir determinacijos R^2 koeficientai, vidutinio standartinio nuokrypio S_e bei Stjudento kriterijaus vertės
Table 4.6. (4.1)–(4.2) multiple correlation R and determination ratios R^2 of empirical equations, average values S_e of standard deviation as well as student's criteria value

Lygtis	Rodikliai	R	R^2	S_e	Stjudento kriterijaus reikšmė
4.1	Poringos erdvės rezervas y_1	0,803	0,644	5,61 %	6,45
4.2	Kapiliarinis masės srauto greitis y_2	0,892	0,795	0,2 g/cm ²	9,45

Iš gautų (4.1) ir (4.2) lygčių Stjudento kriterijaus reikšmių išeina, kad labiausiai keramzitbetonio mišinyje MV atliekos kiekis daro poveikį kapiliariniam srauto greičiui. Kuo bus didesnis MV atliekos kiekis keramzitbetonio mišinyje, tuo bandinių kapiliarinis masės srauto greitis bus didesnis. Tačiau MV atliekos kiekiui didėjant poringumo rezervas dėsningai mažės.

4.5. Sukietėjusio keramzitbetonio mikrostruktūros tyrimai

Po 28 parų kietėjimo laiko ištyrus skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu MV1 bandinių keramzito granulės ir skiedinio dalies kontakto vietą matyti (4.15 pav.), kad keramzito granulė yra visu savo paviršiumi sukibusi su cemento akmens mase.

4.15 pav. MV1 bandinių kontakto zonos tarp keramzito granulės ir skiedinio dalies mikrostruktūros vaizdas: 1 – keramzito granulė; 2 – skiedinio dalis (×200)

Fig. 4.15. MW1 samples' microstructure view of the contact area between granule of expanded-clay and grout part: 1 – granule of expanded-clay; 2 – grout part (×200)

Struktūrų nuotraukose matyti (4.16 pav., a, b), kad mulitinė vata yra plaušinis priedas, kuris galėtų suteikti medžiagai tvirtumo ir padidinti gniuždymo stiprį. Tačiau mulitinės vatos pluoštai yra pernelyg lygaus paviršiaus, o tai blogina sukibtį su kitais komponentais ir didesnis MV kiekis mažina bandinių stiprį.

4.16 pav. Keramzitbetonio bandinių skiedinio dalies mikrostruktūros vaizdas: 1 – MV atliekos plaušeliai; 2 – kapiliarai, poros; a – MV1 bandiniai (×3000); b – MV2 bandiniai (×2000)

Fig. 4.16. Microstructure view of the grout part of the samples of expanded-clay lightweight concrete: 1 – strings of MW waste; 2 – capillaries, pores; a – MV1 samples (×3000); b – MV2 samples (×2000)

4.17 pav. Keramzitbetonio bandinių skiedinio dalies mikrostruktūros vaizdas: 1 – MV atliekos plaušeliai; 2 – kapiliarai, poros; a – MV3 betono mišinys ($\times 3000$); b – MV4 betono mišinys ($\times 2000$)

Fig. 4.17. Microstructure view of the grout part of the samples of expanded-clay lightweight concrete: 1 – strings of MW waste; 2 – capillaries, pores; a – MV3 samples ($\times 3000$); b – MV4 samples ($\times 2000$)

Ištyrus skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu struktūrą (4.17 pav., a, b) pastebėta, kad, be plonų ilgų plaušelių, yra ir trumpesnių, kurie keičia erdvės tarp plaušų tūrį (jis tampa mažesnis). Tačiau net trumpi plaušeliai iki galo nesukontaktuoja su cemento akmeniu. Todėl tęsiant tokius tyrimus tikslingas paviršių aktyvinantis priedas plaušelių ir cemento akmens sukibimui padidinti.

4.6. Ketvirtąjo skyriaus išvados

1. Atliktų tyrimų metu tankio ir gniuždymo stiprio atžvilgiu geriausias nedegtos mulitinės vatos atliekos kiekis keramzitbetonio mišinyje yra 10 % cemento masės. Šių bandinių vidutinis tankis 1407 kg/m^3 , o gniuždymo stipris – 16,8 MPa.
2. Apibendrinant bandinių rentgenografinius tyrimus galima teigti, kad dėl vandens trūkumo keramzitbetonio skiedinio dalies, be tradicinių hidratacijos produktų, randami kristaliniai junginiai – nehidratuotas alitas, gipsas ir etringitas.
3. Nedegtos mulitinės vatos kiekio didinimas vienareikšmiškai mažina maksimalią mišinių egzotermijos temperatūrą (esant pastoviam vandens ir rišiklio santykiui) ir sulėtina mišinių su mulitine vata hidrataciją. MV1

ir MV2 bandinių vandens poreikio rodiklio vertės yra neigiamosios, o tai pavirtina vandens trūkumą, lyginant su bandiniais be šio priedo.

4. Įmaišius į keramzitbetonio mišinius 15 % arba 20 % mulitinės vatos, vidutinis bandinių stipris ir tankis mažėja. Jie turi didesnę įmirkį, efektyvųjį, bendrąjį atvirą poringumą ir mažesnę poringosios erdvės rezervą bei prognozuojamą atsparumą šalčiui. Įdėjus 15 % mulitinės vatos atliekos, bandinių vidutinis tankis buvo 1188 kg/m^3 , o šilumos laidumo koeficiento vidutinė vertė $0,355 \text{ W/mK}$.
5. Atlikus koreliacinę analizę, nustatytos empirinės lygtys, apibūdinančios mulitinės vatos kiekio įtaką keramzitbetonio tankiui, gniuždymo stipriui, poringos erdvės rezervui, įmirkiui ir kapiliariniam masės srauto greičiui, kurios yra tiesinio pobūdžio.

Bendrosios išvados

1. Keramzitbetonio gamyboje jo savybėms pagerinti ir utilizuoti rekomenduojama naudoti naftos krekingo katalizatoriaus ir mulitinės vatos technogenines pramonines atliekas. Nustatyta, kad nemaltas katalizatorius ir nedegta mulitinė vata yra aktyvieji mineraliniai priedai.

2. Geriausias naudoto katalizatoriaus iš naftos krekingo kiekis keramzitbetonio mišiniuose yra 10 % nuo cemento masės. Panaudojus minėtą priedą galima pagaminti stiprų (LC 16/18 stiprio klasės), mažo tankio (D1,4 tankio klasės), ilgaamžišką (prognozuojamas eksploatacinis atsparumas šalčiui – 230 sąlyginių ciklų) su nedideliu šilumos laidumo koeficientu (0,455 W/mK) bei ekonomišką (su mažu cemento kiekiu) keramzitbetonį.

3. Keramzitbetonio skiedinio dalies rentgenografinės analizės rezultatai rodo, kad, naudojant nedidelį katalizatoriaus kiekį (3 % ir 5 %) po 28 parų kietėjimo, aptinkami etringito ir nehidratavusio alito mineralai, o jų ir gipso randama bandiniuose su 15 % naudoto katalizatoriaus.

4. Egzoterminio efekto tyrimų rezultatai rodo, kad didinant naudoto katalizatoriaus kiekį mišiniuose sutrumpėja laikas, per kurį pasiekama maksimali mišinio išilimo temperatūra. Tačiau betono kietėjimo procesų maksimali mišinio išilimo temperatūra viršijo kontrolinių bandinių temperatūrą tik pridėjus nedidelius minėto priedo kiekius (5–10 %) ir procesus greitino, o dedant didesnius kie-

kius (daugiau nei 15–30 %) tapo žemesnė už kontrolinių ir procesus santykinai sulėtino.

5. Pagal tankio ir gniuždymo stiprio tyrimus geriausias nedegtos mulitinės vatos atliekos kiekis keramzitbetonio mišinyje yra 10 %. Šiuo atveju bandinių tankis sumažėja 3,3 %, o gniuždymo stipris – 13,9 %. Tačiau panaudojus 15 % atliekos, gaunamas vidutinis bandinių tankis – 1188 kg/m^3 , o šilumos laidumo koeficiento vidutinė vertė siekia $0,355 \text{ W/mK}$.

6. Keramzitbetonio su mulitinės vatos priedu skiedinio dalies bandiniuose be tradicinių cemento hidratacijos produktų susidaro kristaliniai junginiai: etringitas (5 ir 15 % mulitinės vatos) ir gipsas (5, 10, 15 ir 20 % mulitinės vatos), bei lieka nehidratavusio alito (be priedo, 15 ir 20 % mulitinės vatos priedo). Tai galima paaiškinti vandens trūkumu rišiklio hidratacijos metu, ką rodo neigiamosios vandens poreikio rodiklio vertės, esant 5 ir 10 % mulitinės vatos priedo.

7. Keramzitbetonio mišiniuose didinant mulitinės vatos atliekos kiekį (5–20 %), sulėtėja cementinio rišiklio hidratacija bei sumažėja maksimali mišinio išilimo temperatūra. Dedant į keramzitbetonio mišinį disperguotos mulitinės vatos (10 % nuo cemento masės), maksimali mišinio išilimo temperatūra pasiekama per tą pačią trukmę kaip ir bandiniuose be mulitinės vatos priedo. Mulitinės vatos dispergavimas neturi įtakos keramzitbetonio hidratacijos procesui ir nekeičia maksimalios mišinio išilimo temperatūros ir trukmės.

8. Apskaičiuotos empirinės lygtys ir nustatyta, kad didinant mulitinės vatos atliekų kiekį keramzitbetonio mišiniuose, tiesiškai mažėja bandinių tankis, gniuždymo stipris, poringos erdvės rezervas, tačiau didėja vandens įmirkis ir kapiliarinis masės srauto greitis.

Literatūra ir šaltiniai

Aitcin, P. C. 1998. *High-Performance Concrete*. New York. 624 p.

Ajrapetov, G. A.; Kharchenko, I. J.; Uzhakhov, M. A. 1991 08 07. *Method for preparing expanded-clay lightweight concrete mix*. C04B 38/00. USSR Patent Office, SU1668341.

Aleknevičius, M.; Antonovič, V. 2009. Calorimetric investigations of high aluminate cement hydration in the presence of waste oil-cracking catalyst, *Cheminė technologija* 2(51): 33–38.

Aleknevičius, M. 2010. *The influence of oil cracking catalyst waste on the properties of refractory castables*: Summary of doctoral dissertation. Vilnius: Technika, 24 p.

ASTM Diffraction data cards and alphabetical and grouped numerical index of X-Ray Diffraction Data. 1967. Philadelphia: ASTM.

Balandis, A.; Kaminskas, R.; Vaickelionis, G. 2006. *Statybinių medžiagų chemija. II dalis. Neorganinių rišamųjų medžiagų chemija*: mokomoji knyga. Kaunas: Technologija. 86 p.

Balandis, A.; Jasiukevičius, V.; Martinaitis, M.; Strazdas, K. 1995. *Silikatų technologijos pagrindai*. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidykla. 438 p.

Bektas, F.; Wang, K.; Ceylan, H. 2009. Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability, *Construction and Building Materials* 23(5): 1909–1914.

- Brown, P. W.; Badger, S. 2000. The distributions of bound sulfates and chlorides in concrete subjected to mixed NaCl, MgSO₄, Na₂SO₄ attack, *Cement and Concrete Research* 30(10): 1535–1542.
- Brouwers, H. J. H.; Radix, H. J. 2005. Self-Compacting concrete: theoretical and experimental study, *Cement and Concrete Research* 35(11): 2116–2136.
- Cachim, P. B. 2009. Mechanical properties of brick aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 23(3): 1292–1297.
- Calcium aluminate cements. 1999. *Cement test methods. Exothermic reaction (EXO)*. Alcoa industrial chemicals. 16 p.
- Čekanavičius, V.; Murauskas, G. 2002. *Statistika ir jos taikymas II*. Vilnius: TEV. 268 p.
- Chen, H. L.; Tseng, Y. S.; Hsu, K. C. 2004. Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars, *Cement and Concrete Research* 26(6): 657–664.
- Chen, B.; Liu, J. 2008. Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high strength and workability, *Construction and Building Materials* 22(4): 1108–1113.
- Chia, K. S.; Zhang, M. H. 2004. Effect of chemical admixtures on rheological parameters and stability of fresh lightweight aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research* 8(56): 465–473.
- Cohen, M. D.; Bentur, A. 1988. Durability of Portland cement–silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions, *ACI Materials Journal* 85(3): 148–157.
- Debieb, F.; Kenai, S. 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete, *Construction and Building Materials* 22(5): 886–893.
- Deltuva, J. 1998. *Heterogeninių statybinių mišinių sandara ir savybės: monografija*. Kaunas: Technologija. 264 p.
- Deltuva, J. 2001. Statybinių mišinių struktūros tyrimas, *Statyba [Civil Engineering]* 6(7): 441–445.
- Deltuva, J.; Rudžionis, Ž. 1997a. Mikroužpildų įtakos cementinio akmens savybėms analitinio įvertinimo principai, *Statyba [Civil Engineering]* 2(10): 69–74.
- Deltuva, J.; Rudžionis, Ž. 1997b. Presuoto betono struktūrinių rodiklių ir savybių valdymo principai, iš *Tarptautinės konferencijos „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“*, įvykusios 1997 m. gegužės 21–24 d. pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 92–96.
- Eisinas, A.; Baltakys, K. 2009. Portlandito kiekio hidratuotame portlandcementyje nustatymas vienalaikės terminės analizės metodu, *Cheminė technologija* 1(50): 18–23.
- Furimsky, E. 1996. Spent refinery catalysts: environment, safety and utilization, *Catalysis Today* 30(4): 223–286.

- Gailius, A.; Vėjelis, S. 2009. *Termoizoliacinės medžiagos ir jų gaminiai*: vadovėlis. Vilnius: Technika. 247 p.
- Garcia de Lomas, M.; Sanchez de Rojas, M. I.; Frias, M. 2007. Pozzolanitic reaction of a spent fluid catalytic cracking catalyst in FCC-cement mortars, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 90(2): 443–447.
- Guemmadi, Z.; Resheidat, M.; Houari, H.; Toumi, B. 2008. Optimal criteria of Algerian blended cement using limestone fines, *Journal of Civil Engineering and Management* 14(4): 269–275.
- Gumuliauskas, A.; Skripkiūnas, G. 1997. Cementinis akmuo: struktūros ir savybių formavimasis, iš *Tarptautinės konferencijos „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“*, įvykusios 1997 m. gegužės 21–24 d. pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 59–65.
- Gumuliauskas, A.; Skripkiūnas, G. 2007. Cementbetonio kelias: nuo klasikinio iki racionalaus, *Nauja statyba* 2(24): 48–50.
- Hsu, K.-C.; Tseng, Y.-S.; Ku, F.-F.; Su, N. 2001. Oil cracking waste catalyst as an active pozzolanic material for superplasticized mortars, *Cement and Concrete Research* 31(12): 1815–1820.
- Hwang, C. L.; Sheen, D. H. 1991. The effect of blast-furnace slag and fly ash on the hydration of Portland cement, *Cement and Concrete Research* 21(4): 410–425.
- Ismail, Z. Z.; AL-Hashmi, E. A. 2008. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Management* 28(11): 2041–2047.
- Ismail, Z. Z.; AL-Hashmi, E. A. 2009. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete, *Waste Management* 29(2): 655–659.
- Janavičius, E., Skripkiūnas, G., Daukšys, M. 2008. Šaltilių techninių parametrų gerinimas panaudojant keramzitbetonį, iš *Tarptautinės konferencijos „Pažangioji statyba“*, įvykusios 2008 m. lapkričio 13–14 d. pranešimų medžiaga. Kaunas: Technologija, 248–254.
- Kaminskas, R.; Trakimavičiūtė, K.; Kubiliūtė R. 2010. Degto kaolininio molio įtaka portlandcemenčio savybėms, *Cheminė technologija* 1(54): 5–11.
- Kantautas, A.; Vaickelionis, G. 2000. Modifikuotas pjuvenų betonas, *Statyba* [Civil Engineering] 2(6): 114–120.
- Kasiulevičius, V.; Denapienė, G. 2008. Statistikos taikymas mokslinių tyrimų analizėje, *Gerontologija* 9(3): 176–180.
- Kerševičius, V.; Skripkiūnas, G. 2001. Gumos atliekų naudojimas portlandcementiniame betone, *Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba* 4(18): 40–45.
- Kičaitė, A. 1999. Keraminių gaminių atsparumo šalčiui sparčiųjų prognozavimo metodų raida, *Statyba* [Civil Engineering] 5(3): 222–228.

Kičaitė, A.; Mačiulaitis, R. 2001. Naujos keraminių gaminių atsparumo šalčiui prognozavimo lygtys, naudojant deformacinius rodiklius, *Statyba* [Civil Engineering] 7(2): 131–138.

Kičaitė, A.; Mačiulaitis, R. 2002. Keraminių gaminių įmirkio kinetika eksploatacinio atsparumo šalčiui aspektu, *Journal of Civil Engineering and Management* 8(2): 126–131.

Kinuthia, J.; Snelson, D.; Gailius, A. 2009. Sustainable medium-strength concrete (CS-concrete) from colliery spoil in South Wales UK, *Journal of Civil Engineering and Management* 15(2): 149–157.

Kizinievič, O.; Žurauskienė, R.; Mačiulaitis, R.; Kičaitė, A. 2008. Study of the technological raw materials (catalyst) of the oil industry and possibility to utilize them in the constructional ceramics production, in *7th International Conference Environmental Engineering: selected papers*. May 22–23, 2008. Vol. 1. Vilnius: Technika. 175–181.

Kochurov, I. F.; Panov, A. I.; Zekina, L. N. 1991 10 07. *Mixture of raw materials for production of lightweight concrete*. C04B 38/08. USSR Patent Office, SU1682353.

Korotina, Z. M.; Kliger, A. B.; Fishman, M. A.; Peres, F. S.; Kogos, A. Y. 1990 10 23. *Raw stock for producing expanded-clay lightweight concrete articles*. C04B 38/08. USSR Patent Office, SU1601095.

Krasnovskij, B. M.; Khanina, Z. M.; Vikhrov, V. A. 1991 11 07. *Method of electric heating up of expanded clay-cement mixture*. C04B 38/00. USSR Patent Office, SU1689362.

KTM-3 Umega [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2011 06 08]. Prieiga per internetą: <<http://www.umega.lt/index.php?cid=6456&pid=3479>>.

Laukaitis, A. 2000. *Akytųjų betonų formavimo mišinių ir gaminių savybės*: monografija. Vilnius: Technika. 232 p.

Lesovik, V. S.; Savin, D. V.; Tolypina, N. M.; Strokova, V. V. 2010 02 20. *Mixture for manufacturing of expanded clay concrete*. Russian Federation Patent RU2382015.

Liukaitis, J.; Kleveckas, T. 2006. *Medžiagų tyrimo pagrindai*. Kaunas: Technologija. 76 p.

LST 1428.18:1997 *Betonas. Bandymo metodai. Vandens įgeriamumo nustatymas*. Vilnius, 1997. 4 p.

LST 1577.1:1999 *Betono ir skiedinio mikroužpildai. Bandymo metodai*. Vilnius, 1999. 5 p.

LST 1413.12:1998 *Statybinis skiedinys. Bandymo metodai. Tinko ir kitokios apdailos atsparumo šalčiui nustatymas vienpusio šaldymo būdu*. Vilnius, 1998. 9 p.

LST 1428.19:1998 *Betonas. Bandymo metodai. Atsparumo šalčiui nustatymas vienpusio šaldymo būdu*. Vilnius, 1998. 9 p.

LST EN 12620:2003+A1:2008 *Betono užpildai*. Vilnius, 2008. 49 p.

LST EN 206-1:2002 Betonas. 1 dalis. Techniniai reikalavimai, savybės, gamyba ir atitikis. Vilnius, 2002. 68 p.

LST EN 12390-2:2009 Betono bandymas. 2 dalis. Bandinių stipriui nustatyti pagaminimas ir kietinimas. Vilnius, 2009. 8 p.

LST EN 12390-3:2009 Betono bandymas. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris. Vilnius, 2009. 19 p.

LST EN 12390-7:2009 Betono bandymas. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis. Vilnius, 2009. 10 p.

LST EN 12350-2:2009 Betono mišinio bandymai. 2 dalis. Slankumo bandymas. Vilnius, 2009. 7 p.

LST EN 13055-1:2003 Lengvieji užpildai. 1 dalis. Lengvieji betono, skiedinio ir injekcinio skiedinio užpildai. Vilnius, 2002. 37 p.

LST EN 1745:2002 Mūras ir jo gaminiai. Projektinių šiluminių verčių nustatymo metodai. Vilnius, 2002. 65 p.

LST EN 933-1:2002 Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Gramulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas. Vilnius, 2002. 11 p.

LST EN 197-1. Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai. Vilnius, 2000. 26 p.

Lo, T. Y.; Tang, W. C.; Cui, H. Z. 2007. The effects of aggregate properties on lightweight concrete, *Building and Environment* 42(8): 3025–3029.

Lo, T. Y.; Cui, H. Z.; Tang, W. C.; Leung, W. M. 2008. The effect of aggregate on pore area at interfacial zone of lightweight concrete, *Construction and Building Materials* 22(4): 623–628.

Lu, J. 2010 06 23. *Ceramsite concrete insulating brick and production method thereof.* Int. Cl.: C04B 28/00. China patent, CN101748841.

Mačiulaitis, R. 1996. *Fasadinės keramikos atsparumas šalčiui ir ilgaamžiškumas.* Vilnius: Technika. 132 p.

Mačiulaitis, R.; Kičaitė, A. 2002. New possibilities for rapid predicting the frost resistance of façade ceramics, *Materials Science (Medžiagotyra)* 8(4): 469–472.

Mačiulaitis, R.; Malaiškienė, J.; Kičaitė, A. 2008. The regulation of physical and mechanical parameters of ceramic bricks depending on the drying regime, *Journal of Civil Engineering and Management* 14(4): 263–268.

Mačiulaitis, R.; Nagrockienė, D.; Malaiškienė, J. 2004. Comparative research on exploitation frost resistance of ceramics and concrete, *Materials Science (Medžiagotyra)* 10(4): 353–358.

Mačiulaitis, R.; Nagrockienė, D. 2001. Akytojo betono atsparumo šalčiui, taikant skirtingas bandymų metodikas, vertinimas, *Statyba* 7(5): 397–404.

Mačiulaitis, R.; Nagrockienė, D. 2002. Requirements for the durability of wall facing according to the resistance to freezing, *Materials Science* 8(1): 100–104.

Mačiulaitis, R.; Žvironaitė, J.; Žemaitytė, D. 1997. Durability of the exterior decorative laminae of buildings, in *The 5th International conference Modern building materials, structures and techniques*, Vol. 1. Vilnius: Technika, 15–20.

Mačiulaitis, R.; Žemaitytė, D. 1999. Frost resistance of aerated concrete, in *The 6th International conference Modern building materials, structures and techniques*. Vilnius: Technika, 67–72.

Mačiulaitis, R.; Žemaitytė, D. 1998. Substantiation of new standard methods for definition of operational frost resistance of facing protections and concrete, *Statyba* 4(3): 227–234.

Mačiulaitis, R.; Žurauskienė, R. 2007. *Mažo poringumo statybinė keramika iš vietinių ir technogeninių žaliavų*: monografija. Vilnius: Technika. 220 p.

Maksimov, S. V.; Chelokidi, A. N. 1987 09 23. *Method of producing expanded-clay light-weight concrete articles*. B28B 1/10. USSR Patent Office, SU1339021.

Martinėnas, B. 2004. *Eksperimento duomenų statistinė analizė*. Vilnius: Technika. 101 p.

Martusevičius, M.; Kaminskas, R.; Mituzas, J. A. 2002. *Rišamųjų medžiagų cheminė technologija*. Kaunas: Technologija, 206 p.

Maxit lt – Fibo keramzitiniai blokėliai [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2011 06 21]. Prieiga per internetą: <<http://lt.maxit-cms.com/2218/>>.

Mikulskis, D. 2007. *The influence of fibrous additives on the properties of autoclaved aerated porous concrete*. Summary of doctoral dissertation. Vilnius: Technika. 23 p.

Mituzas, A. 1999. *Portlandcemenčio klinkerio mineralų faziniai virsmai degimo ir hidratacijos metu tiriant atrankiniais reagentais*: habilitacinis darbas. Kaunas: KTU. 86 p.

Mituzas, J.; Mituzas, A.; Kaminskas, R. 2001a. Strength properties, chemical composition and microstructure of the different fraction cement stone, *Materials Science (Medžiagotyra)* 3(7): 183–185.

Mituzas, J.; Mituzas, A. 2001b. Frakcionuoto cemento savybės, *Cheminė technologija* 2(19): 27–31.

Mueller, A.; Sokolova, S. N.; Vereshagin, V. I. 2008. Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials, *Construction and Building Materials* 22(4): 703–712.

Nagrockienė, D. 2001. Betonų atsparumo šalčiui nustatymo ypatumai, iš *Ketvirtosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“*, įvykusios Vilniuje balandžio 23 d. *Chemija ir medžiagotyra*. Vilnius: Technika, 169–172.

Nagrockienė, D. 2010. Possibilities to forecast the frost resistance by structural parameters of concrete, in *The 10th International conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*, Vol. 1. Vilnius: Technika, 15–20.

tures and Techniques: selected papers. May 19–21, 2010. Vol. 1. Vilnius: Technika, 218–222.

Nagrockiėnė, D.; Kičaitė, A.; Mačiulaitis, R. 2004. Possibilities to forecast the frost resistance of constructional concrete, in *The 8th International conference Modern building materials, structures and techniques: selected papers*: May 19–21, 2004 Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 120–123.

Nagrockiėnė, D.; Žurauskienė, R. 2007. *Statybinės medžiagos ir jų gaminiai*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 182 p.

Narullin, R. M.; Tikhonov, V. B. 1998 01 27. *Raw materials mixture for manufacturing of light concrete*. C04B 38/08. Russian Federation Patent RU2103240.

Naujokaitis, A. 2006. *Statybinės medžiagos. Užpildai*: mokomoji knyga, Vilnius: Technika. 247 p.

Naujokaitis, A. 2007. *Statybinės medžiagos. Betonai*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 356 p.

Østnor, T. 2007. *Alternative pozzolans as supplementary cementitious materials in concrete. Sintef Report*. 25 p.

Pacewska, B.; Bukowska, M.; Wilinska, I.; Swat, M. 2002a. Modification of the properties of concrete by a new pozzolan. A waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed, *Cement and Concrete Research* 32(1): 145–152.

Pacewska, B.; Wilinska, I.; Bukowska, M. 2000. Hydration of cement slurry in the presence of spent cracking catalyst, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 60(1): 71–78.

Pacewska, B.; Wilinska, I.; Bukowska, M.; Nocun-Wczelik, W. 2002b. Effect of waste aluminosilicate material on cement hydration and properties of cement mortars, *Cement and Concrete Research* 32(11): 1823–1830.

Pacewska, B.; Wilinska, I.; Kubissa, J. 1998. Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive, *Thermochimica Acta* 322(2): 175–181.

Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S. 2010. Reusing ceramic wastes in concrete, *Construction and Building materials* 24(5): 832–838.

Paya, J.; Monzo, J.; Borrachero, M. V. 2001. Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements, *Cement and Concrete Research* 31(1): 57–61.

Paya, J.; Monzo, J.; Borrachero, M. V.; Velazquez, S.; Bonilla, M. 2003a. Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R-lime pastes, *Cement and Concrete Research* 33(7): 1085–1091.

Paya, J.; Monzo, J.; Borrachero, M. V.; Velazquez, S. 2003b. Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research* 33(4): 603–609.

Paya, J.; Monzo, M.; Borrachero, V. 1999. Fluid catalytic cracking residue (FC3R): An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures, *Cement and Concrete Research* 29(11): 1773–1779.

Petrella, A.; Petrella, M.; Boghetich, G.; Petruzzelli, D.; Calabrese, D.; Stefanizzi, P.; De Napoli, D.; Guastamacchia, M. 2007. Recycled waste glass as aggregate for lightweight concrete, *Construction Materials* 160(4): 165–170.

Pioro, L. S.; Pioro, I. L. 2004. Production of expanded-clay aggregate for lightweight concrete from non-selfbloating clays, *Cement and Concrete Composites* 26(6): 639–643.

Rusin, S. P.; Dolgikh, T. A. 1999 08 27. *Method of manufacturing porous expanded clay concrete*. C04B 38/08. Russian Federation Patent, RU2135435.

Sakalauskas, V. 2003. *Duomenų analizė su Statistica*. Vilnius: Margi raštai. 235 p.

Sanchez de Rojas, M. I.; Frias, M. 1996. The pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars, *Cement and Concrete Research* 26(2): 203–213.

Sasnauskas, K.; Skripkiūnas G. 2001. Vandens ir kietosios dispersinės fazės sąveika statybiniuose mišiniuose, *Cheminė technologija* 4(21): 25–30.

Schenkel, R. 2004. *Sorption of small polar molecules on micro- and mesoporous zeolitic materials* [interaktyvus], [žiūrėta 2011 05 26]. Prieiga per internetą: <http://deposit.ddb.de/cgiin/dokserv?idn=971839387&dok_var=d1&dok_ext=pdf&file_name=971839387.pdf>.

Shannag, M. J. 2011. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures, *Construction and Building Materials* 25(2): 658–662.

Sinica, M. 2001. *Dispersive and fibrous inclusion influence on porous concrete composite materials properties*: Summary of doctoral dissertation. Vilnius: Technika. 44 p.

Skripkiūnas, G. 2007. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*: vadovėlis. Kaunas: Vitae Litera. 334 p.

Skripkiūnas, G.; Vaitkevičius, V. 2001. Stambiojo užpildo koncentracijos įtaka betono stiprumui ir skiedininės dalies poringumui, *Statyba* [Civil Engineering] 6(7): 446–452.

Stonys, R.; Pundienė, I.; Antonovič, V.; Goberis, S.; Aleknevičius, M. 2008. The effect of waste oil-cracking catalyst on the properties of MCC-type castable, *Materials Science (Medžiagotyra)* 14(1): 59–62.

Strazdas, K.; Eidukevičius, J. 1985. *Mineralinis ir stiklo pluoštas*. Vilnius: Mokslas. 224 p.

Su, N.; Chen, Z. H.; Fang, H. Y. 2001. Reuse of spent catalysts as fine aggregate in cement mortar, *Cement and Concrete Composites* 23(1): 111–118.

Su, N.; Fang, H.-Y.; Chen, Z.-H.; Liu, F.-S. 2000. Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution, *Cement and Concrete Research* 30(11): 1773–1783.

Sun, N.; Gu, H.; Sun, C. 2009 02 25. *Light ceramsite concrete and preparation thereof*. Int. Cl.: C04B 28/00. China patent, CN101372413.

Szwabowski, J.; Lazniewska-Piekarczyk, B. 2009. Air-entrainment problem in self compacting concrete, *Journal of Civil Engineering and Management* 15(2): 137–147.

Taylor, H. F. W. 1997. *Cement chemistry*. Second Edition. Oxford. 459 p.

Tseng, Y. S.; Huang, C. L.; Hsu, K. C. 2005. The pozzolanic of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials, *Cement and Concrete Research* 35(4): 782–787.

Uselytė, R.; Silvestravičiūtė, I.; Karaliūnaitė, I. 2007. *Atliekų panaudojimo naujiems produktams gaminti ir šių produktų įteisinimo galimybių studija*. Vilnius: Ekokonsultacijos. 89 p.

Vaitkevičius, V. 2002. *Investigation of structure and properties of high-strength concrete*: Summary of doctoral dissertation. Kaunas: Technologija. 34 p.

Vektaris, B.; Vilkas, V. 2006. *Betono tvarumas*: monografija. Kaunas: Technologija. 163 p.

Vyrodov, V. I.; Bratchikov, V. G.; Zakharchenko, P. V. 1986 03 05. *Raw mixture for producing porous expanded-clay lightweight concrete*. C04B 28/08. USSR Patent Office, SU1217835.

Wu, J.-H.; Wu, W.-L.; Hsu K.-C. 2003. The effect of waste oil-cracking catalyst on the compressive strength of cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research* 33(2): 245–253.

Zornoza, E.; Garces, P.; Monzo, J.; Borrachero, V.; Paya, J. 2007. Compatibility of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) with various types of cement, *Advances in Cement Research* 3(19): 117–124.

Zornoza, E.; Paya, J.; Monzo, J.; Borrachero, V.; Garces, P. 2009. The carbonation of OPC mortars partially substituted with spent fluid catalytic catalyst (FC3R) and its influence on their mechanical properties, *Construction and Building Materials* 23(3): 1323–1328.

Агеев, Д. Н.; Щеканенко, Р. А.; Заботин, Ю. Н. 1963. Влияние состава керамзитобетона на его прочность и деформации, *Бетон и железобетон* 2: 83–88.

Адамсон, А. 1979. *Физическая химия поверхностей*. Москва: Мир. 568с.

Аксомитас, А. 1970. Состояние, перспективы и проблемы развития производства и применения конструкций из легких бетонов, *Материалы Республиканской конференции*. Октябрь, 3–11. Каунас.

АСиА НИИЖБ. 1963. *Исследование свойств керамзитобетона*, Москва: Госстройиздат. 131 с.

Баженов, Ю. М. 1975. *Способы определения состава бетона различных видов*. Москва: Стройиздат. 271 с.

Бужевич, Г. А.; Сысоев, Б. В.; Козельцева, Г. М.; Понасюженков, Я. Д. 1964. Исследование свойств керамзитобетона, *Бетон и железобетон* 4: 170–174.

Бужевич, Г. А. 1970. *Легкие бетоны на пористых заполнителях*. Москва: Стройиздат. 272 с.

Васильев, Е. К.; Нахмансон, М. М. 1986. *Качественный рентгенофазовый анализ*. Новосибирск: Наука. 200 с.

Виноградов, Б. 1979. *Влияние заполнителей на свойства бетона*. Москва: Стройиздат. 224 с.

Гоберис, С.; Пундене, И. 2002. Жаростойкий керамзитобетон повышенной прочности, *Бетон и железобетон* 6: 9–12.

Горчаков, Г. И.; Хигерович, М. И.; Иванов, О. М.; Домокеев, А. Г.; Ерофеева, Е. А.; Орендлихер, Л. П. 1976. *Вяжущие вещества, бетоны и изделия из них*. Москва: Высшая школа. 294 с.

Горчаков, Г. И. 1964. Морозостойкость бетона в зависимости от его капиллярной пористости, *Бетон и железобетон* 7: 302–306.

Горин, В. М.; Токарева, С. А.; Кабанова, М. К. 2010. Высокопрочный керамзит и керамдор для несущих конструкций и дорожного строительства, *Строительные материалы* 1: 9–11.

Грызлов, В. С. 1992. Влияние структуры легкого бетона на его теплотехнические свойства, *Строительные материалы* 2: 23–25.

Довжик, В. Г., Дорф, В. А., Петров, В. П. 1976. *Технология высокопрочного керамзитобетона*, Москва: Стройиздат. 136 с.

Ковба, Л. М.; Трунов, В. К. 1976. *Рентгенофазовый анализ*. Москва: МГУ. 232 с.

Копылов, В. Д. 2000. Теоретические предпосылки вакуумной обработки свежесушеного керамзитобетона на основе разогретых смесей, *Бетон и железобетон* 3: 8–11.

Косухин, М. М.; Шаповалов, Н. А. 2006. Повышение морозостойкости керамзитобетона полифункциональными модификаторами, *Строительные материалы* 11: 66–68.

Кузнецова, Т. В.; Кудряшов, И. В.; Тимашев, В. В. 1989. *Физическая химия вяжущих материалов*. Москва: Высшая школа. 384 с.

Ласис, А. Ю.; Ярулайтис, В. Ю.; Станайтис В. Ю. 1985. *Разработать и внедрить новые, а также усовершенствовать действующие технологические процессы производства керамических изделий. Подобрать формовочные шихты и разработать технологические параметры производства керамзита в новом цеху Игналинского КСМ*. Книга II. Заключительный отчет. 76 с.

Любецкис, Ш. И. 1964. Производство крупнопанельных домов на Вильнюсском заводе железобетонных конструкций, *Бетон и железобетон* 3: 102–106.

Мачюлайтис, Р. 1997. *Морозостойкость и долговечность изделий фасадной керамики: монография*. Вильнюс: Техника. 307 с.

Михеев, В. И. 1957. *Рентгенометрический определитель минералов*. Москва: Госгеолтехиздат, Т. 1. 868 с.

Мчедлов-Петросян, О. П. 1988. *Химия неорганических строительных материалов*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Стройиздат. 304 с.

Мчедлов-Петросян, О. П.; Ушеров-Маршак, А. В.; Урженко, А. М. 1984. *Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов*. Москва: Стройиздат. 224 с.

Подвальный, А. М. 1985. *Элементы теории стойкости бетона и железобетонных изделий при физических воздействиях среды*. Автореферат докт. дисс. НИРЮКБ. Москва. 40 с.

Прохоров, А. М. 1984. *Физический энциклопедический словарь*. Москва: Советская энциклопедия. 944 с.

Прохоров, И. Б. 2004. Применение микронаполнителя в бетонах, *Современные наукоемкие технологии* 2: 160–161.

Пушаровский, Д. Ю. 2000. *Рентгенография минералов*. Москва: Геоинформмарк. 292 с.

Русяцкас, Д. В. 1987. Архитектурные проблемы монолитного домостроения, *Все-союзное совещание. Индустриальные методы домостроения. Монолит-87*. Вильнюс, Москва: Госгражданстрой, 42–44.

Спивак, Н. Я.; Баулин, Д. К.; Баджаган, В. С. 1965. Влияние структуры керамзитобетона на его свойства в стеновых панелях, *Бетон и железобетон* 11: 15–19.

Спивак, Н. Я.; Ушков, Ф. В.; Умняков, П. Н.; Тачкова, Н. А. 1963. Теплопроводность керамзитобетона, *Бетон и железобетон* 2: 137–140.

Сычев, М. М. 1974. *Твердение вяжущих веществ*. Ленинград: Стройиздат. 80 с.

Тейлор, Х. 1996. *Химия цемента*. Москва: Мир. 560 с.

Туркестанов, Г. А. 1964. Пористость цементного камня и качество бетона, *Бетон и железобетон* 11: 514–517.

Фролов, Ю. Г. 1982. *Курс коллоидной химии: поверхностные явления и дисперсные системы*. Москва: Химия. 400 с.

Хигерович, М. И. 1970. *Строительные материалы*. Москва: Стройиздат. 367 с.

Чентемиров, М. Г.; Горных, В. П. 1963. *Производство и применение керамзита*. Москва: Госстройиздат. 104 с.

Шейнин, А. М.; Эккель, С. В.; Феднер, Л. А. 2008. Об ускоренном определении морозостойкости бетона, *Бетон и железобетон* 3: 29–30.

Шпынова, Л. Л.; Чих, В. И.; Саницкий, М. А. 1981. *Физико-химические основы формирования структуры цементного камня*. Львов: Вища школа. 160 с.

Ярулайтис, В.; Навицкас, И. 1970. Производство керамзита на палемонском керамическом заводе, *Материалы Республиканской конференции*. Каунас, 15–21.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Mačiulaitis, R.; Vaičienė, M.; Žurauskienė, R. 2009a. The effect of concrete composition and aggregates properties on performance of concrete, *Journal of Civil Engineering and Management* 15(3): 317–324. ISSN 1392-3730 (Thomson ISI Web of Science).

Mačiulaitis, R.; Vaičienė, M.; Žurauskienė, R. 2009b. Analysis of the properties of lightweight concrete with the technogenic waste material, *Materials Science (Medžiagotyra)* 15(4): 363–367. ISSN 1392-1320 (Thomson ISI Web of Science).

Vaičienė, M. 2009. Technogeninių, statybinių ir buitinių atliekų naudojimas gaminant betoną, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 1(5): 20–24. ISSN 2029-2341 (Index Copernicus).

Vaičienė, M.; Malaiškienė, J. 2010. Keramzitbetonio fizikinių-mechaninių savybių priklausomybė nuo sudėties, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(6): 50 – 55. ISSN 2029-2341 (Index Copernicus).

Straipsniai kituose leidiniuose

Vaičienė, M. 2007. Keramzitbetonio su gamybine atlieka stipris gniuždant, iš *10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ pranešimų medžiaga*. Vilnius: Technika, 119–123.

Mačiulaitis, R.; Vaičienė M.; Žurauskienė, R. 2010. Microstructure analysis of the structure of materials used for the mixture of expanded-clay lightweight concrete with additives of raw material, in *The 10th international conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*. Vilnius: Technika, 189–194. ISBN 978-9955-28-593-9. (Thomson ISI Proceedings).

Patento paraiška

Vaičienė, M.; Mačiulaitis, R.; Žurauskienė R.; Malaiškienė, J. 2011 03 21. *Šalčiui atsparus padidinto stiprio keramzitbetonis*. Lietuvos Respublikos valstybinis patentų biuras. Paraiškos Nr. 2011 021.

Marija VAIČIENĖ

AKTYVIŲJŲ PRIEDŲ POVEIKIS KERAMZITBETONIO
STRUKTŪRAI IR SAVYBĖMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (02T)

Marija VAIČIENĖ

INFLUENCE OF THE ACTIVE ADDITIVES ON THE STRUCTURE
AND PROPERTIES OF EXPANDED-CLAY LIGHTWEIGHT CONCRETE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2011 12 05. 10,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“,
J. Jasinskio g. 16A, 01112 Vilnius