

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Modestas KLIGYS

**KOMPOZITINĖS MEDŽIAGOS
IŠ PORINGOSIOS CEMENTO TEŠLOS
IR TRUPINTO POLISTIRENINIO
PUTPLASČIO GAMYBOS TECHNOLOGIJA
IR SAVYBĖS**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Disertacija rengta 2005–2009 metais Vilniaus Gedimino technikos universiteto Termoizoliacijos institute.

Mokslinis vadovas

Prof. habil. dr. Antanas LAUKAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universiteto Termoizoliacijos institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Konsultantas

Dr. Marijonas SINICA (Vilniaus Gedimino technikos universiteto Termoizoliacijos institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VG TU leidyklos TECHNIKA 1659-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-481-9

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2009

© Modestas Kligys, 2009

moby2000@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Modestas KLIGYS

**PRODUCTION TECHNOLOGY AND
PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL
MADE OUT OF POROUS CEMENT PASTE
AND CRUSHED EXPANDED
POLYSTYRENE**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2009

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University Institute of Thermal Insulation in 2005–2009.

Scientific Supervisor

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

Consultant

Dr Marijonas SINICA (Vilnius Gediminas Technical University Institute of Thermal Insulation, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T).

Reziumė

Polistireninio putplasčio (PPS) savybė sugerti smūgius, palyginti mažos gamybos išlaidos ir paprasta gamybos technologija sąlygojo jo, kaip medžiagos, skirtos pakavimo tarai gaminti, didelį populiarumą. Milžiniški PPS pakavimo taros kiekiai visame pasaulyje plačiai naudojami dūžtančių elektronikos prietaisų ir jų detalių apsaugai, kuri reikalinga elektronikos gaminius transportuojant iš gamyklos vartotojui. Iki šių dienų Lietuvoje PPS pakavimo taros atliekų utilizavimo problema spręsta nebuvo, todėl tokios atliekos tiesiog buvo vežamos į sąvartynus.

Šiame darbe sukurta 150–350 kg/m³ tankio kompozitinė medžiaga, kurioje kaip tarpai naudojamos trupintos PPS pakavimo taros atliekos kartu su poringąja cemento tešla, kuri yra matrica. Aktyviųjų paviršiaus medžiagų (APM) naudojimas padeda panaikinti tarpų hidrofobę prigimtį ir sumažinti matricos tankį. Matricos tankis ir kiekis kompozitinės medžiagos bandinio tūryje lemia jo tankį ir kitas savybes.

Darbe parinkti efektyviausias APM priedas ir efektyviausia maišyklės konstrukcija, optimalios 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos formavimo mišinių sudėtys, sukurta jos gamybos technologinė schema ir išnagrinėtos minėto tankio bandinių savybės.

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

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, tyrimo objektas ir metodika, darbo aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas darbo mokslinis naujumas, nurodoma darbo rezultatų praktinė reikšmė, įvardijami ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose ir disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Skyriaus pabaigoje formuluojami apibendrinimas ir išvados, tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašyta naudotų žaliavų savybės, formavimo mišinių paruošimas ir bandinių eksperimentams formavimas, tyrimų metodikos.

Trečiajame skyriuje pateikiami vandeninių APM tirpalų savybių tyrimai.

Ketvirtajame skyriuje pateikiami cemento tešlos ir cemento akmens savybių tyrimai.

Penktajame skyriuje pateikiami 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių savybių tyrimai.

Šeštajame skyriuje pateikiama kompozitinės medžiagos gamybos technologija.

Disertacijos tema paskelbti 7 straipsniai: du – *Springer* duomenų bazėje cituojamame žurnale, vienas – *Inspec* duomenų bazėje cituojamame žurnale, vienas – recenzuojamoje tarptautinių konferencijų medžiagoje bei trys – respublikinės konferencijos medžiagoje. Disertacijos tema perskaityti 6 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

Abstract

The property of expanded polystyrene (EPS) to absorb shocks, rather low its making costs and simple production technology preconditioned big popularity of it, as of a material designed for production of packages. The enormous quantities of EPS packages all over the world are used to protect fragile electronic devices and their parts in transportation from factory to consumer. So far in Lithuania the problem of utilization of waste EPS packages has not been investigated, and this kind of waste was simply transported to the dumping grounds.

In this work the composite material with density of 150–350 kg/m³ was developed applying crushed waste EPS packages as inclusions together with porous cement paste as matrix. Surfactants help to eliminate hydrophobic nature of inclusions and to reduce density of matrix. The density and amount of matrix in volume of composite material sample determines its density and properties.

The most effective surfactant, mixer design and optimal compositions of formative mixtures of composite material with density of 150, 250 and 350 kg/m³ were choosed, technological production scheme was developed and properties of samples with mentioned densities were investigated in this work.

The dissertation is composed of four parts including *Introduction, 6 chapters, Conclusions and References*.

The introduction reveals topicality of the problem, subject and methodology of research and importance of the work, also describes main objective and tasks, scientific novelty, practical value and defended propositions. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the scope of scientific work.

Chapter 1 revises used literature. At the end of the chapter, generalization and conclusions are drawn and tasks for the dissertation are reconsidered.

Chapter 2 describes properties of raw materials, preparation of formative mixes and samples for the experiments, research methodology.

Chapter 3 presents the research on properties of surfactant water solutions.

Chapter 4 presents the research on properties of fresh and hardened cement paste.

Chapter 5 presents the research on properties of composite material samples with densities of 150, 250 and 350 kg/m³.

Chapter 6 presents the composite material production technology.

7 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: two articles – in the journal quoted by *Springer* data base, one – in the journal quoted by *Inspec* data base, one article – in material reviewed during international conference and three articles during a national conferences. 6 presentations on the subject have been given in conferences at national and international level.

Terminai ir apibrėžimai

1. Aktyvioji paviršiaus medžiaga (APM) – medžiaga, kuri, įterpta į skysčio ar kietojo kūno paviršių, sumažina to paviršiaus įtempį (Valiukėnas and Žilinskas 2006).
2. Betono mišinys – rišamosios medžiagos šešlos, užpildų ir technologinių priedų nesukietėjęs mišinys (Daukšas *et al.* 2003).
3. Cementas – tam tikros cheminės sudėties neorganinių medžiagų milteliai, kurie su vandeniu sudaro ilgaiui sukietėjančią tešlą. (LST 1341:1995).
4. Cemento akmuo – sukietėjusi cemento tešla (Daukšas *et al.* 2003).
5. Cemento tešla – klampus cemento ir vandens mišinys (Daukšas *et al.* 2003).
6. Granulimetrinė sudėtis – dalelių pagal stambumą pasiskirstymas, išreikštas išbirų per nustatytą sietų skaičių masės procentais (LST EN 12620:2003).
7. Intarpai (užpildai) – miltelinės, granulinės, chaotiškos trumpapluoštės, kryptingos ilgapluoštės bei sluoksninės organinės arba mineralinės medžiagos, sudarančios neaktyviąją kompozitinės medžiagos mišinio dalį ir kurių paskirtis yra keisti jos stipruminius, šiluminius, elektrinius ir kitus rodiklius (Marčiukaitis 1998).

8. Įtempis – įrašų, atsiradusių dėl išorinių poveikių, intensyvumas kūno taške, plote, erdvėje. Jis išreiškiamas veikiančios jėgos ir ploto, į kurį veikia jėga, dalmeniu (Švenčianas and Adomavičius 2004).
9. Įtrauktasis oras – betono mikroskopinės oro pūslelės, susidarančios ruošiant betono mišinį su specialiai įterptomis aktyviosiomis paviršiaus medžiagomis. Paprastai pūslelių dydis kinta nuo 10 μm iki 300 μm , o forma – rutulinė arba jai artima (LST EN 206-1:2002).
10. Kompozitinė medžiaga – tai mažiausiai dviejų skirtingų medžiagų junginys, kuriame galima nustatyti ribas, atskiriančias jį sudarančias medžiagas (Marčiukaitis 1998).
11. Matrica – ištisinė sudedamoji dalis visame kompozito tūryje, garantuojanti jo vienalytiškumą, fiksuojanti gaminio formą ir tarpų tarpusavio išsidėstymą bei apkrovos tolygų pasiskirstymą visame kompozite (Marčiukaitis 1998).
12. Mineralinė rišamoji medžiaga – mineraliniai milteliai, su vandeniu, druskų ar šarmų tirpalais sudarantys tešlą, kietėjančią dėl joje vykstančių fizikinių ir cheminių procesų ir gerai sukimbančių su užpildais (LST 1341:1995).
13. Piltinis tankis – laisvai supiltų birių medžiagų masės santykis su jų užimamu tūriu (LST 1341:1995).
14. Polistirenas (PS) – aromatinis polimeras, sudarytas iš stireno monomerų. Jis gali būti kietas arba išpūstas dujomis (Daukšas *et al.* 2003).
15. Polistireninis putplastis (PPS) – standi poringa medžiaga, pagaminta sulydžius išpūsto polistireno arba vieno iš jo kopolimerų granules, kurių uždaros poros užpildytos oru (LST EN 13163:2003).
16. Poringasis betonas – betonas, kurio akytumas yra nuo 5 % iki 15 % tūrio (LST 1341:1995).
17. Priedas – medžiaga, kuri pridedama į betono mišinį jo ruošimo metu ir kurios mažas kiekis cemento masėje keičia betono mišinio arba betono savybes (LST EN 206-1:2002).
18. Rišimasis – rišamosios medžiagos tešlos plastiškumo mažėjimas (Daukšas *et al.* 2003).
19. Stambumas – dalelių rodiklis, apibūdinamas apatinio sieto (d) ir viršutinio sieto (D) akelių matmenimis (LST EN 12620:2003).
20. Tešla – mineralinės rišamosios medžiagos miltelių ir vandens (kai kuriais atvejais druskų ar šarmų tirpalo) klampus mišinys (LST 1341:1995).
21. Vandens ir cemento santykis (V/C) – veiksnus vandens ir cemento masių santykis betono mišinyje (LST EN 206-1:2002).
22. Veiksnus vandens kiekis – skirtumas tarp bendrojo ir tarpuose įsigėrusio vandens kiekių paruoštame betono mišinyje (LST EN 206-1:2002).

Turinys

IVADAS.....	1
Tiriamoji problema.....	1
Tyrimo objektas.....	2
Tyrimo metodika	2
Darbo aktualumas.....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
1. LITERATŪROS ANALIZĖ.....	7
1.1. Aktyviosios paviršiaus medžiagos.....	7
1.2. Lengvieji betonai kaip kompozitinė medžiaga	24
1.3. Lengvųjų betonų savybės	28
1.4. Kompozitinės medžiagos su polistireninio putplasčio intarpais.....	31
1.5. Pirmojo skyriaus apibendrinimas ir išvados.....	34

2. NAUDOTŲ MEDŽIAGŲ APRAŠYMAS IR TYRIMŲ METODIKOS.....	36
2.1. Naudotos medžiagos.....	36
2.2. Tirpalų ir formavimo mišinių paruošimas bei bandinių formavimas	38
2.3. Tyrimų metodikos	40
2.4. Antrojo skyriaus išvados	53
3. VANDENINIŲ APM TIRPALŲ TYRIMAI	53
3.1. Paviršiaus įtempis.....	53
3.2. Vilgymo kampas.....	54
3.3. Sukibties darbas.....	56
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	57
4. CEMENTO TEŠLOS IR CEMENTO AKMENS TYRIMAI	58
4.1. Cemento tešlos tyrimai	58
4.2. Cemento akmens tyrimai	63
4.3. Ketvirtąjo skyriaus išvados	69
5. KOMPOZITINĖS MEDŽIAGOS SAVYBIŲ NUSTATYMAS	71
5.1. Tankis	71
5.2. Makrostruktūra	72
5.3. Mikrostruktūra.....	75
5.4. Gniuždomasis stipris	80
5.5. Lenkiamasis stipris	84
5.6. Spūdumas	88
5.7. Šilumos laidumo koeficientas	89
5.8. Sutelktosios apkrovos poveikis	91
5.9. Kapiliarinės įgerties koeficientas	92
5.10. Laidumas vandens garams	94
5.11. Higroskopinė sorbcija	97
5.12. Džiūstamasis susitraukimas.....	101
5.13. Atsparumas šalčiui	102
5.14. Degumas	106
5.15. Penktojo skyriaus išvados	113
6. KOMPOZITINĖS MEDŽIAGOS GAMYBOS TECHNOLOGIJA	115
6.1. Polistireninio putplasčio pakavimo taros atliekų smulkinimo linija....	115
6.2. Kompozitinės medžiagos gamybos technologinė schema.....	117
6.3. Šeštojo skyriaus išvados	119
BENDROSIOS IŠVADOS.....	120
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	122
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	136

Contents

INTRODUCTION	1
Topicality of the Problem	1
Subject of Research	2
Methodology of Research.....	2
Importance of the Work.....	2
Main Objective	3
Main Tasks	3
Scientific Novelty	4
Practical Value.....	4
Defended Propositions.....	5
Approval of Results	5
Scope of Scientific Work.....	6
1. ANALYSIS OF REFERENCES	7
1.1. Surfactants	7
1.2. Lightweight Concretes as Composite Materials	24
1.3. Properties of Lightweight Concretes	28
1.4. Composite Materials with Expanded Polystyrene Inclusions	31
1.5. Generalization and Conclusions for Chapter 1	34

2. USED MATERIALS AND RESEARCH METHODOLOGY	36
2.1. Used Materials.....	36
2.2. Preparation of Solutions and Formative Mixtures and Formation of Samples	38
2.3. Research Methodology	40
2.4. Conclusions for Chapter 2	53
3. INVESTIGATION OF SURFACTANT WATER SOLUTIONS.....	53
3.1. Surface Tension.....	53
3.2. Contact Angle.....	54
3.3. Work of Adhesion	56
3.4. Conclusions for Chapter 3	57
4. INVESTIGATION OF FRESH AND HARDENED CEMENT PASTE.....	58
4.1. Investigation of Fresh Cement Paste	58
4.2. Investigation of Hardened Cement Paste	63
4.3. Conclusions for Chapter 4	69
5. DETERMINATION OF PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL ...	71
5.1. Density	71
5.2. Macrostructure.....	72
5.3. Microstructure	75
5.4. Compressive Strength.....	80
5.5. Bending Strength.....	84
5.6. Thickness for Floating Floor	88
5.7. Thermal Conductivity Coefficient.....	89
5.8. Behaviour Under Point Load.....	91
5.9. Water Absorption Due Capillary Action.....	92
5.10. Water Vapour Transmission.....	94
5.11. Hygroscopic Sorption	97
5.12. Drying Shrinkage	101
5.13. Frost Resistance.....	102
5.14. Combustibility	106
5.15. Conclusions for Chapter 5	113
6. PRODUCTION TECHNOLOGY OF COMPOSITE MATERIAL	115
6.1. Crushing Line for Waste Expanded Polystyrene Packages.....	115
6.2. Technological Scheme for Production of Composite Material	117
6.3. Conclusions for Chapter 6	119
GENERAL CONCLUSIONS.....	120
REFERENCES	122
LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	136

Ivadas

Tiriamoji problema

Lietuva jau 5 metus yra visateisė Europos Sąjungos narė, kurioje skiriama daug dėmesio aplinkosaugai, tačiau darbų, skatinančių atliekų rūšiavimą ir jų perdirbimą, mūsų šalyje atlikta nedaug. Polistireninio putplasčio (PPS) pakavimo taros atliekos tiek anksčiau, tiek dabar vežamos į šalies sąvartynus.

Vienas iš būdų, leidžiančių mažinti minėtų atliekų kiekį, gali būti jų, kaip intarpų, panaudojimas naujoje kompozitinėje medžiagoje, kurioje matrica yra poringoji cemento tešla. Norint užtikrinti geras jos gaminių savybes, galima šias atliekas smulkinti iki reikiamo dydžio, tačiau tai atlikti yra sudėtinga dėl didelių jų matmenų – (1300x1400x360) mm. Net ir tinkamai susmulkintų minėtų atliekų panaudojimas, o kartu ir populiarumas, yra ribotas. Maišymo metu dėl mažo tankio ir hidrofobiškumo jos blogai dengiasi cemento tešla, iškyla į formavimo mišinio paviršių, todėl jis išsisluoksniuoja. Iš tokio kompozitinės medžiagos formavimo mišinio pagaminti gaminiai neturės vienalytiškumo, todėl jų tūryje vyraus skirtingos savybės. Jų nebus galima panaudoti įvairioms statinių konstrukcijoms.

Tyrimo objektas

Darbo tyrimų objektas yra kompozitinė medžiaga iš poringosios cemento teslos ir trupintų PPS pakavimo taros atliekų ir atskiros jos sudedamosios dalys.

Tyrimo metodika

Atlikti APM vandeninių tirpalų, cemento teslos ir cemento akmens bei skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių eksperimentiniai tyrimai. Statistinės analizės metodais gautos empirinės lygtys, galiojančios eksperimento ribose.

Darbo aktualumas

Panaudojus aktyviausias paviršiaus medžiagas (APM), galima ne tik pagerinti minėtos kompozitinės medžiagos hidrofobinų tarpų dengimą matrica, bet ir suformuoti oro tuštumas joje. Yra žinoma, kad APM iki tam tikro laipsnio mažina skystos fazės paviršiaus įtempį (palengvina oro ištraukimą į ją) bei veikia įvairių medžiagų dengimą skystąja faze (vilgymo arba plovimo procesai). Taip pat žinoma, kad nuo šių dviejų rodiklių tiesiogiai priklauso APM tirpalo sukibties darbas. Kuriant tokią kompozitinę medžiagą, kurios tankį (taip pat ir kitas savybes) daugeliu atvejų lemia matricos tankis, APM efektyvumą reikia vertinti būtent pagal minėtąjį rodiklį. Tačiau skirtingų rūšių ir koncentracijų APM tirpalų sukibties darbo poveikis kompozitinės medžiagos matricos porizacijos laipsniui nėra nustatytas. Norint sukurti tokią lengvą kompozitinę medžiagą, reikia kruopščiai parinkti optimalias formavimo mišinių sudėtis ir gamybos technologinius parametrus. To neįmanoma padaryti be jos sudedamųjų dalių ir visos kompozitinės medžiagos tyrimo.

Matricoje esančios oro tuštumos taip pat yra tarpai. Jų susidarymas ir egzistavimo trukmė formavimo mišinyje priklauso nuo individualių mišinio savybių ir daugelio technologinių veiksnių. Sukurti tokią kompozitinę medžiagą, kurioje vyrauja dviejų rūšių tarpai, ir prognozuoti jos savybes yra labai sudėtinga.

Nuolat brangstanti šilumos energija ir vis aktualesnė tampanti pastatų renovacija lemia ir statybinių termoizoliacinių medžiagų kainų augimą. Konkuruoti su importuojama ir vietine produkcija galima tik siūlant rinkai pigesnes arba efektyvesnes statybines termoizoliacines medžiagas. Tačiau gaminio kaina ir savybės nėra vieninteliai rodikliai, lemiantys jų populiarumą.

Atliekamų darbų našumas ir įrenginių kaina taip pat yra svarbūs sėkmingo verslo rodikliai. Taigi, kuriant naują kompozitinę medžiagą reikia į juos atsižvelgti.

Darbo tikslas

Sukurti 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinę medžiagą, kurioje matrica yra poringoji cemento tešla, o intarpai – trupintos polistireninio putplasčio (PPS) pakavimo taros atliekos. Parinkti minėtos kompozitinės medžiagos formavimo mišinių sudėtis, gamybos technologinius parametrus ir ištirti jos bandinių savybes.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti skirtingos rūšies ir koncentracijų vandeninių APM tirpalų savybes ir jų poveikį sukibčiai tarp kompozitinės medžiagos matricos ir intarpų.
2. Ištirti skirtingos rūšies ir koncentracijų APM priedų ir technologinių veiksnių poveikį kompozitinės medžiagos matricos porizacijai. Remiantis tyrimų rezultatais parinkti patį efektyviausią APM priedą ir jo koncentraciją bei maišymo įrenginį ir optimalų maišymo laiką jame.
3. Parinkti 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos formavimo mišinių sudėtis ir maišymo parametrus.
4. Nustatyti skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių savybes: tankį, makro- ir mikrostruktūrą, gniuždomąjį ir lenkiamąjį stiprį, sutelktosios apkrovos poveikį, spūdumą, šilumos laidumo koeficientą, kapiliarinės įgerties koeficientą, laidumo vandens garams koeficientą, higroskopinę sorbciją, džiūstamąjį susitraukimą, atsparumą šalčiui ir degumą.
5. Sukurti kompozitinės medžiagos iš poringosios cemento tešlos ir trupintų PPS pakavimo taros atliekų gamybos technologinę schemą.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Iširtos skirtingos rūšies (anijoninės, anijoninės-nejoninės) ir koncentracijų (0,033–0,297 %) vandeninių APM tirpalų savybės ir apskaičiuotas jų sukibties darbas ant hidrofobinio parafino paviršiaus, leidžiantis numatyti taip pat hidrofobinių intarpų iš PPS pakavimo taros atliekų dengimą matrica.
2. Remiantis tyrimų rezultatais nustatytas efektyviausias APM priedas (Ufapore TCO) ir optimali jo koncentracija (0,03 %, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės), užtikrinantys pakankamą matricos porizaciją ir gerą jos sąlytį su PPS intarpais, nuo kurio priklauso visos kompozitinės medžiagos vienalytiškumas.
3. Sukurtas vienos stadijos kompozitinės medžiagos sudedamųjų dalių hidrofilizacijos ir sumaišymo vertikalioje maišyklėje būdas.
4. Sukurtos 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos iš poringosios cemento tešlos ir PPS pakavimo taros atliekų formavimo mišinių sudėtys.
5. Nustatytos priklausomybės tarp skirtingo tankio kompozitinės medžiagos struktūros ir kitų jos savybių: tankio, gniuždomojo ir lenkiamojo stiprių, sutelktosios apkrovos poveikio, spūdumo, šilumos laidumo koeficiento, kapiliarinės įgerties koeficiento, laidumo vandens garams koeficiento, higroskopinės sorbcijos, džiūstamojo susitraukimo, atsparumo šalčiui ir degumo.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurta 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinė medžiaga iš poringosios cemento tešlos ir trupintų PPS pakavimo taros atliekų, kuri gali būti naudojama gyvenamųjų ir pramoninių pastatų grindų, sienų ir stogų konstrukcijų apšiltinimui. Jos gamybos technologija nereikalauja sudėtingų gamybos įrenginių, todėl pastatuose, įrengiant šilumos izoliacijos sluoksnį, reikiamo tankio kompozitinę medžiagą galima suformuoti statybos aikštelėje.

Ginamieji teiginiai

1. Kompozitinės medžiagos matricos formavimo mišinio porizacijos laipsnį lemia APM tirpalo sukibties darbas.
2. Intarpų hidrofilizacija užtikrina gerą jų pasiskirstymą kompozitinės medžiagos tūryje ir glaudų sąlytį su matrica.
3. Tinkamai porizavus matricą ir parinkus tam tikro dydžio intarpus iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų bei jų kiekius ir šiuos intarpus hidrofilizavus, galima pagaminti efektyvius termoizoliacines kompozitinės medžiagos gaminius.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbtos 3 mokslinės publikacijos recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (ISI) bazės Mokslo citavimo indeksų (SCI) pagrindinių leidinių sąrašą (Master Journal List). 4 straipsniai paskelbti kituose mokslo leidiniuose. Disertacijoje teikiama medžiaga buvo paskelbta 1 tarptautinėje ir 5 respublikinėse konferencijose:

1. The Influence of the Structure of Light Weight Concrete on Its Properties, *International Conference on Building Materials, held of September 20–23, 2006, Weimar.*
2. Kompozito iš poringojo betono ir polistireno granulių degumo ir termoizoliacinių savybių tyrimai, *9-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, 2006 m. kovo 30 d., Vilnius.*
3. Poringojo betono formavimo būdų paieška, *9-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, 2006 m. kovo 30 d., Vilnius.*
4. Kompozito iš porizuoto betono ir trupintų putų polistireno taros atliekų gamybos technologija ir panaudojimo galimybės, *10-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, 2007 m. kovo 27 d., Vilnius.*
5. Putų polistireno pakavimo taros atliekų panaudojimo lengvojo betono gamybai ypatumai, *Konferencija „Silikatų technologija“, 2007 m. balandžio 27 d., Kaunas.*

6. Paviršių aktyvinančių medžiagų įtaka poringojo betono savybėms, *Respublikinė konferencija „Medžiagų inžinerija 2007“, 2007 m. lapkričio 16 d., Kaunas.*

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, šeši skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Darbo apimtis yra 150 puslapių, tekste panaudotos 22 numeruotos formulės, 77 iliustracijos ir 10 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudotas 191 literatūros šaltinis.

Literatūros analizė

1.1. Aktyviosios paviršiaus medžiagos

Su APM susiduriame kasdien, naudodami asmens higienos priemonės (skysti muilai ir valymo losjonai, šampūnai ir plaukų gaivikliai, dantų pastos) ir buitinę chemiją (indų plovikliai, skalbimo milteliai, dezinfekcijos priemonės) (Eldridge 1997; HUELS CHEMISCHE WERKE AG 1999; Addy *et al.* 1989; Mino 1987; Polefka 1999; DOW CHEMICAL CO 1989). Tokios medžiagos plačiai naudojamos vaistų (farmacijos), popieriaus, tekstilės, maisto, mikrobiologijos ir metalurgijos pramonėje, plastiko ir kai kurių statybinių medžiagų gamyboje, žemės ūkyje, transporte, naftos ir dujų gavyboje bei kalnakasyboje (Elworthy *et al.* 1968; Shwartz *et al.* 1977; Jacobi *et al.* 1987; Dalgleish 2003; Singh *et al.* 2007; Gupta 2003; Neidleman 1987; Stoye and Freitag 1998; Rao 1999; AKZO NOBEL NV 1999; Reed and Healy 1977; Franklin *et al.* 2002; Janczuk 2006). Norint pritaikyti APM konkrečiai gamybos arba gavybos sričiai, reikia žinoti pagrindines jų savybes, veikimo principus ir panaudojimo galimybes.

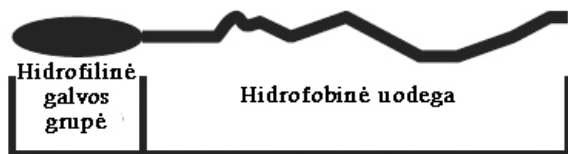
APM sąvoka. Hidrofilinės (graikų kalba „hydros“ – vanduo, „philos“ – draugas) molekulės geriausiai tirpsta vandenyje (polinis tirpiklis), o hidrofobinės – nepoliniame tirpiklyje. Molekulės, kurios sudarytos iš abiejų –

hidrofobinės ir hidrofilinės dalių, yra vadinamos amfifilais (Sarma 2004; Radbound University). Žodis „amfifilas“ buvo pasiūlytas P. Winsor (1954) prieš 55 metus ir yra sudarytas iš dviejų graikų kalbos šaknų. Priešdėlis „amphi“ reiškia „dvigubas“, „iš abiejų pusių“, o šaknis „philos“, kaip jau buvo minėta anksčiau, – „draugas“ arba „trauka“ (Radbound University 2007; Quinn 2001).

Amfifiliškumas rodo dvigubą trauką, kuri fizikiniu–cheminiu požiūriu gali būti charakterizuojama kaip polinis–nepolinis dvilypumas. Tipinė amfifilinė molekulė susideda iš dviejų dalių: polinės (hidrofilinės) grupės sudarytos iš heteroatomų (O, S, P ar N), esančių funkcinių grupių (alkoholiai, tioliai, esteriai, rūgštys, sulfatai, sulfonatai, fosfatai, aminai, amidai ir t.t.) sudėtyje, ir nepolinės (hidrofobinės) grupės (angliavandenilinė alkilo arba alkilbenzeno tipo grandinė), kartais turinčios halogeno ar net kelis nejonizuoto deguonies atomus (Salager 2002).

Terminas „aktyvioji paviršiaus medžiaga“ buvo pasiūlytas, kad būtų galima atskirti tas amfifilines medžiagas, kurios turi savybę adsorbuotis ant sistemos paviršių, modifikuodamos jų sąlyčio laisvas energijas (López-Trosell 2005). Reikėtų paminėti, kad taip adsorbuotis gali tik tokie amfifilai, kurie turi daugmaž subalansuotus hidrofilinę ir hidrofobinę polinkius. Adsorbicija nevyks, jei amfifilinė molekulė bus per daug hidrofilinė arba hidrofobinė, nes tuomet ji liks vienoje iš fazių (Salager 2002; West and Harwell 1992).

APM molekulė turi mažiausiai dvi funkcines dalis. Polinė dalis dažniausiai vadinama hidrofiline galvos grupe, o nepolinė – hidrofobine uodega (Von Bahr 2003). Pagrindinė cheminė APM prigimtis parodyta 1.1 paveiksle. Dėl dvilypės traukos tiek poliniame, tiek nepoliniame tirpiklyje APM molekulės negali išlikti pasyvios. Tokioje molekulėje visada yra funkcinė dalis, kuri reaguoja į tirpiklio aplinką. Dėl šios priežasties APM molekulės tendencingai migruoja į skystos–dujinės, skystos–skystos arba skystos–kietos fazių sąlyčio zoną ir orientuoja savo funkcinę dalį su didžiausia trauka tam tirpikliui, į tą tirpiklį, o kita APM molekulės dalis sukasi priešinga kryptimi, kad išvengtų sąlyčio su tuo tirpikliu (Salager 2002; Rasaiah 2001).



1.1 pav. Pagrindinė cheminė APM prigimtis (Chatterji 2003)

Fig. 1.1. Basic chemical nature of surfactants (Chatterji 2003)

APM klasifikacija. Pagal kilmę APM skirstomos į biologines (išskiria mikroorganizmai) ir sintetines (sukuria žmogus) (Fiechter 1992; Makkar and Rockne 2003). Pramonėje daugiausia naudojamos sintetinės APM. Jų paprasčiausias klasifikavimas paremtas hidrofilinės galvos prigimtimi (Tadros 2005). Pagal tai jos skirstomos į anijonines, katijonines, amfolitines ir nejonines (University of Sydney: Key centre for polymers & colloids 2005). Pirmosios trys klasės sudaro joninių, turinčių krūvį, APM grupę, o nejoninės APM krūvio neturi. Ant skystos fazės lašelių arba kietos fazės dalelių joninės APM sukuria turinčius krūvį paviršius, o nejoninės APM – apsaugines dangas (Rasaiah 2001; Morrison 2006). Skirtingas joninių ir nejoninių APM pobūdis parodytas 1.2 paveiksle.

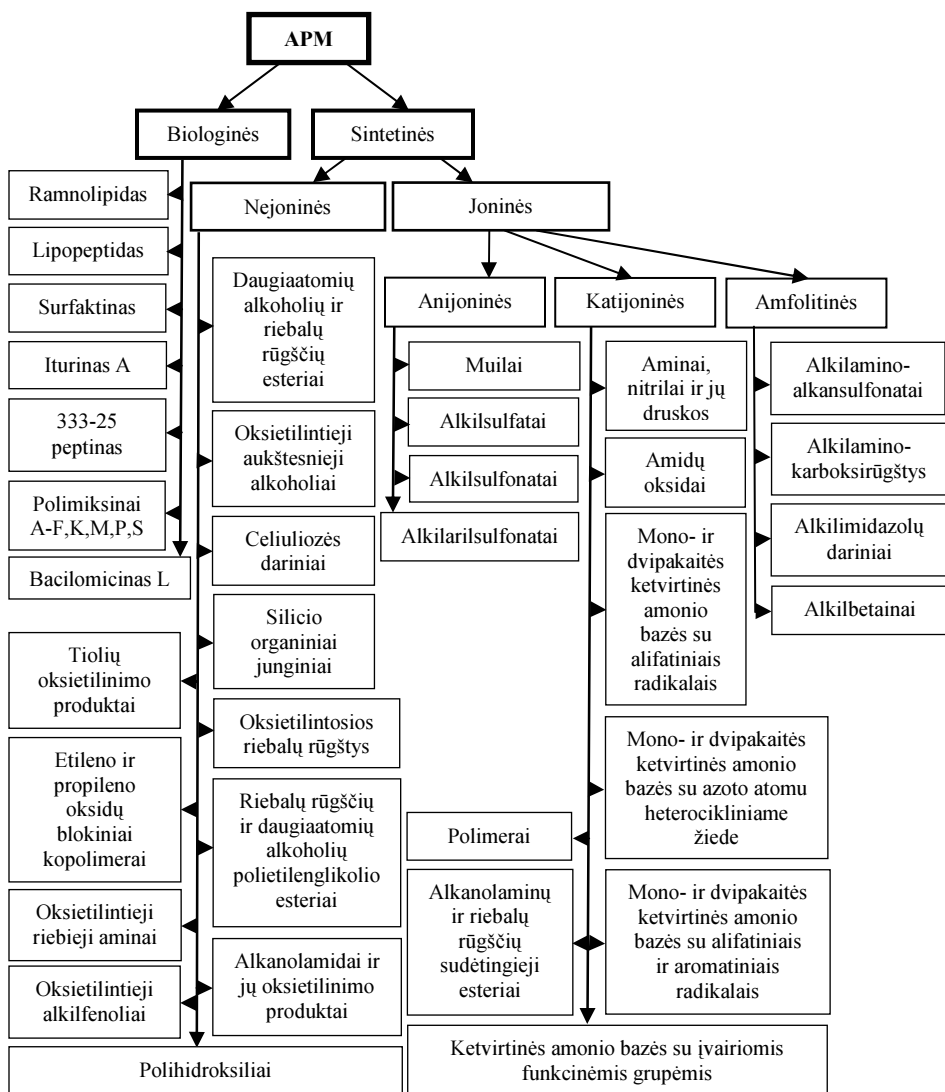


1.2 pav. APM ant skystos fazės lašelių arba kietos fazės dalelių (Morrison 2006):
a – joninės; b – nejoninės

Fig. 1.2. Surfactants on liquid phase drops or solid phase particles (Morrison 2006):
a – ionic; b – nonionic

Anijoninėmis APM vadinami tokie amfifilai, kurie vandenyje disocijuoja į neigiamą krūvį turintį anijoną (aktyvios funkcinės grupės: $-\text{SO}_3\text{H}^-$; $-\text{COO}^-$ ir kt.) ir teigiamą krūvį turintį katijoną (dažniausiai šarminių metalų: Na^+ ; K^+ ir kt.). Katijoninėmis APM vadinami tokie amfifilai, kurie vandenyje disocijuoja į teigiamą krūvį turintį katijoną (aktyvios funkcinės grupės: $-\text{NH}_2^+$; $-\text{NH}^{2+}$ ir kt.) ir neigiamą krūvį turintį anijoną (dažniausiai neorganinių ir organinių rūgščių liekanos: Cl^- ; Br^- ; $-\text{RCOO}^-$ ir kt.). Amfolitinės APM yra neutralios, tačiau turi funkcines grupes tiek su teigiamu, tiek su neigiamu krūviais, todėl šarminėje aplinkoje disocijuoja kaip anijoninės, o rūgštinėje – kaip katijoninės APM (Četkauskaitė 1999). Nejoninėmis APM vadinami amfifilai, kurie tirpaluose neturi molekulinės dalies nei su teigiamu, nei su neigiamu krūviais. Jų amfifiliškumą sąlygoja funkcinės grupės, turinčios tik solvatavimosi savybių, bet ne polinkį disocijuoti (Musnickas 2001). Smulkesnis APM skirstymas

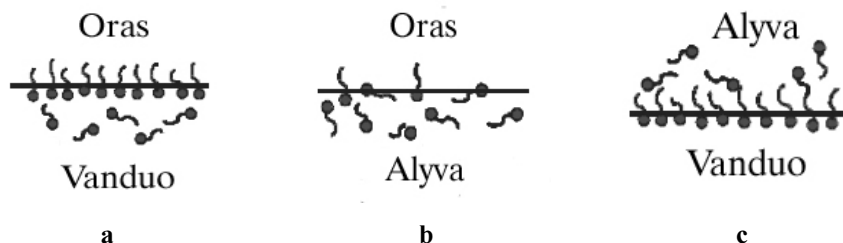
pateiktas 1.3 paveiksle. APM taip pat galima klasifikuoti pagal dydį, molekulinę masę, hidrofilinių ir hidrofobinių dalių skaičių jose (Rasaiah 2001; Myers 1999).



1.3 pav. APM skirstymas (Četkauskaitė 1999)
Fig. 1.3. Regimentation of surfactants (Četkauskaitė 1999)

APM skystoje fazėje. Svarbiausios APM savybės yra tirpumas, kritinė micelių koncentracija (KMK), dinaminis ir pusiausvyras paviršiaus įtempiai, vilgymas, putodaros geba, molekulių plotas vandeninio tirpalo ir oro sąlyčio zonoje, hidrotropija (Rosen *et al.* 1992). Gamtoje daugelis cheminių reakcijų vyksta vandeninėje terpėje, todėl dažnai didelis dėmesys skiriamas skysčių savybėms ir struktūrai (Ivanauskas 2006). Vandens paviršiaus įtempis, esant 20 °C temperatūrai, yra 73 mN/m (Takamura 2006). Norint, kad APM mažintų vandens paviršiaus įtempį, jos turi būti tirpios jame. APM rūšis lemia jų tirpumą vandenyje. Joninių APM tirpumas priklauso nuo hidrofilinių grupių elektrolitinės disociacijos ir solvatacijos, o nejoninių APM – nuo poliarizuotų, bet nedisocijuotų hidrofilinių grupių hidratacijos (Musnickas 2001). Nejoninių APM tirpumas vandenyje vyksta dėl vandenilinio ryšio tarp tirpiklio ir hidrofilinės APM grupės. Kadangi vandenilinis ryšys yra jautrus temperatūrai, kiekvienai APM yra būdinga temperatūra, kuriai esant hidrofilinės dalies hidratacijos laipsnis yra nepakankamas, kad galėtų ištirpinti likusią angliavandenilinę dalį. Ši temperatūra vadinama drumstimosi temperatūra (DT). Esant šiai temperatūrai, APM vandenyje daugiau netirpsta, tirpalas pasidaro drumzlinas (Schott 2001; Iwanga and Kunieda 2000; Inoue *et al.* 2003). Skirtingų APM tirpumas vandenyje nagrinėtas daugelyje darbų (Moroi *et al.* 1986; Bajouk and Sköld 2003; Decesari *et al.* 2003). Pavyzdžiui, M. Tanaka (*et al.* 1973, 2005) nagrinėjo temperatūros ir slėgio poveikį APM tirpumui vandenyje.

APM besiadisorbuodamos skystos–dujinės fazių sąlyčio zonoje mažina skystos fazės (pvz., vandens) paviršiaus įtempį. Didelė adsorbcija – didelis paviršiaus įtempio sumažėjimas (1.4 pav. a), maža adsorbcija – mažas paviršiaus įtempio sumažėjimas (1.4 pav. b). Besiadisorbuodamos jos taip pat sumažina įtempį skystos–skystos fazių sąlyčio zonoje (pvz., vanduo–alyva). Didelė adsorbcija – didelis įtempio fazių sąlyčio zonoje sumažėjimas (1.4 pav. c).

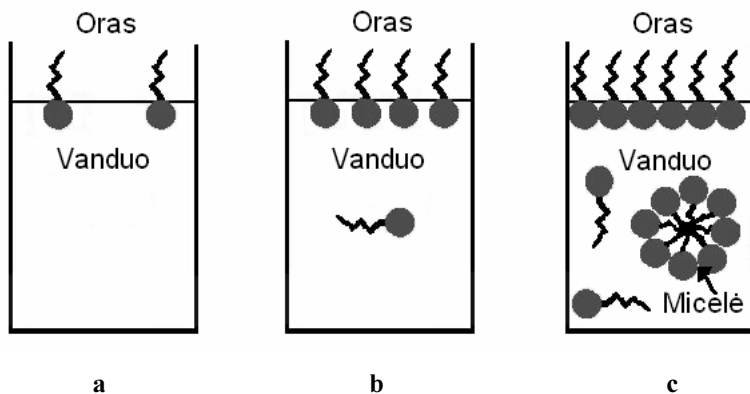


1.4 pav. APM molekulių išsidėstymas dujinės ir skystos (a ir b) arba skystos ir skystos (c) fazių sąlyčio zonoje (Morrison 2006)

Fig. 1.4. Distribution of surfactant molecules at contact line of vapour and liquid (a and b) or liquid and liquid (c) phases (Morrison 2006)

APM adsorbcija ant kietų dalelių nagrinėjo Hough ir Rendal (1983), o APM adsorbuotų sluoksnių fizikocheminės savybės apibūdintos daugeliu metodų, įskaitant elektroskopiją, atominio magnetinio rezonanso spektroskopiją ir atominės jėgos mikroskopiją (Chandar *et al.* 1987; Esumi *et al.* 1990; Esumi *et al.* 1991; Levitz *et al.* 1984; Soederlind and Stilbs 1993; Tiberg *et al.* 1994; Manne *et al.* 1994; Manne *et al.* 1997).

Net jei bet kokių APM koncentracija vandenyje yra labai maža, jų molekulės kaupiasi skystos ir dujinės fazių sąlyčio zonoje, todėl mažėja vandens paviršiaus įtempis (1.5 pav. a). Didinant APM koncentraciją vandeniniame tirpale, didėja ir koncentracija minėtų fazių sąlyčio zonoje (1.5 pav. b). Kai šių fazių sąlyčio zona visiškai pasidengia APM molekulėmis, likusios APM molekulės savaime agreguojasi ir suformuoja didesnius agregatus – micleles (1.5 pav. c). Koncentracija, kuriai esant APM vandeniniame tirpale pradeda savaime agreguotis į micleles, vadinama kritine micelių koncentracija (KMK). Toliau didinant APM koncentraciją, kai ji ir taip yra didesnė už KMK, micelių koncentracija tirpale didėja, o monomerų koncentracija jame lieka beveik nepakitusi. Micelės nedalyvauja vandens tirpalo paviršiaus įtempio mažinimo procese, todėl jo vertė nekinta. Eksperimentais galima nustatyti charakteringą lūžį kreivėse (paviršiaus įtempis-APM koncentracija). Šį lūžį atitinkanti APM koncentracija yra lygi KMK (Schramm and Marangoni 2000).

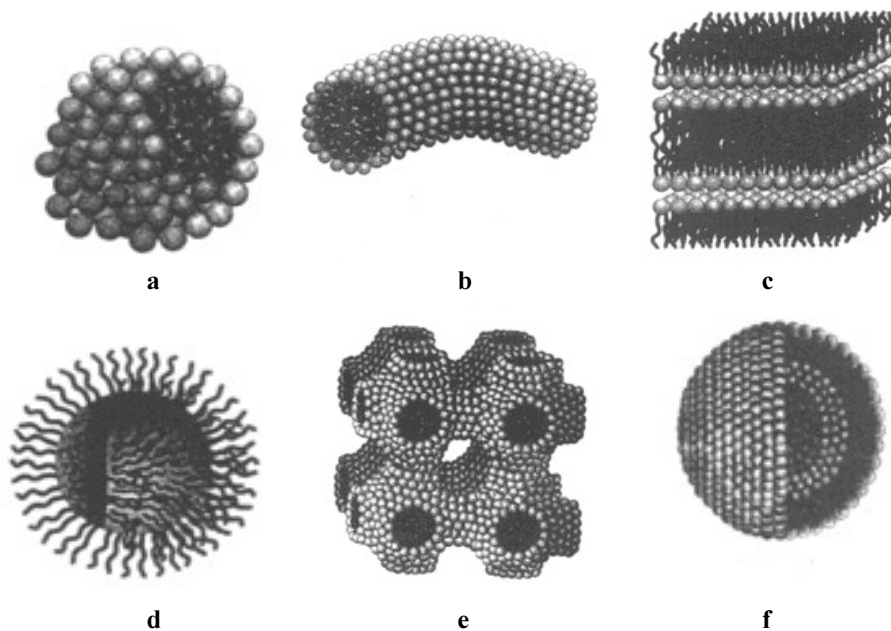


1.5 pav. Micelių formavimasis vandeniniame tirpale

Fig. 1.5. Formation of micelles in water solution

KMK yra vienas svarbiausių APM rodiklių, lemiančių tolesnį jos praktinį panaudojimą. Įvairių APM KMK vandeniniuose tirpaluose tirta įvairiuose darbuose (Brito and Vaz 1986; De Vendittis *et al.* 1981; Mandal and Nair 1991). APM molekulės vandeniniame tirpale savaime besijungdamos į micleles

sudaro tam tikras geometrines formas (1.6 pav.) (Schramm and Marangoni 2000).



1.6 pav. APM agregavimo metu susidarančios skirtingos struktūros grupės (Holmberg et al. 2003): a – rutulinė micelė; b – ritininė micelė; c – lamelinė fazė; d – atvirkštinė micelė; e – dviejų krypčių ištisinė struktūra; f – vezikulė

Fig. 1.6. Groups of different structure formed during the process of surfactant aggregation (Holmberg et al. 2003): a – spherical micelle; b – cylindrical micelle; c – lamellar phase; d – reversed micelle; e – bicontinuous structure; f – vesicle

P. Lecomte du Noüy (1919) žiedo metodas yra plačiai paplitęs ir dažnai taikomas APM tirpalų pusiausvirajam paviršiaus įtempiai nustatyti (Lunkenheimer and Wantke 1981). Pagal šį metodą pusiausvirasis paviršiaus įtempis yra susijęs su jėga, reikalinga ištraukti vielos žiedui iš skystos ir dujinės fazių sąlyčio zonos. Autoriai (Theander and Pugh 2001) minėtu metodu tyrė natrio oleato vandeninių tirpalų pusiausvirąjį paviršiaus įtempį (pH kito 7–13, o temperatūra 20–60 °C ribose). W. Rybinski ir kiti (1998) minėtu metodu tyrė pusiausvirąjį paviršiaus įtempį tarp alyvos ir vandens skirtingo poliariškumo mikroemulsijose (sistemos sudarytos iš nejoninių APM, vandens, alyvos ir priedų, tokių kaip alkoholiai ir elektrolitai). Nustatyta, kad, didinant alkinės grandinės ilgį, pusiausvirojo paviršiaus įtempio vertė pastebimai mažėja,

temperatūros pokyčio (20–65 °C ribose) poveikis yra nežymus, o druskų koncentracijos poveikis yra labai silpnas. Autoriai (Miller and Lunkenheimer 1983) ištyrė, kad APM, kurių paviršiaus aktyvumas lygintinas, tirpalų adsorbcijos pusiausvyra nusistovi skirtingai, o tai gali apsunkinti pusiausvyroje paviršiaus įtempio nustatymą. Didesnis APM paviršiaus aktyvumas skatina ilgesnę adsorbcijos pusiausvyros būvio nusistovėjimo trukmę, kuri kartais negali būti eksperimentiškai įvykdyta. Norint gauti labai stiprių APM tirpalų tiksliai pusiausvyroje paviršiaus įtempio vertes, siūlomas ekstrapoliacijos-interpoliacijos algoritmas, paremtas adsorbcijos-desorbcijos matavimais. Autoriai (Iliev and Dushkin 1992), nagrinėdami skirtingų koncentracijų APM (natrio dodecilsulfato ir nonilfenolio poliglikolio eterio) vandeninius tirpalus, taip pat nustatė, kad pusiausviris paviršiaus įtempis gali būti pasiektas po neriboto laiko, o didinant APM koncentraciją, paviršiaus įtempis mažėja greičiau.

Priklausantis nuo laiko paviršiaus įtempis, kai laikas pradedamas matuoti nuo naujo sąlyčio formavimosi iki tol, kol pasiekama pusiausvyra, yra vadinamas dinaminio paviršiaus įtempio. Laikas, reikalingas sistemai subalansuoti, yra dinaminė sąveika tarp APM molekulių, esančių skirtingų fazių sąlyčio zonoje, ir tų, kurios yra tirpale (Buzzacchi *et al.* 2006). Dinaminis paviršiaus įtempis dažniausiai matuojamas maksimalaus burbulo slėgio metodu, greitu ir patikimu, pasiūlytu M. Simon (1851) maždaug prieš 160 metų. Šio metodo esmė yra ta, kad į tiriamą tirpalą panardinto kapiliaro (į kurį leidžiamos dujos, kurių slėgis pastoviai kontroliuojamas) gale dėl dujų slėgių skirtumo susidaro burbuliukas. Slėgių skirtumas, reikalingas burbuliukui suformuoti, yra proporcingas tirpalo paviršiaus įtempio (Schulze and Lohmann 1999). Autoriai (Lylic *et al.* 1998) taikė maksimalaus burbulo slėgio metodą (30 °C temperatūra, 0,2 % nejoninių APM vandeninis tirpalas), siekdami nustatyti kapiliaro savybių poveikį dinaminio paviršiaus įtempio matavimo rezultatams. Jie nustatė, kad patikimų rezultatų galima tikėtis naudojant palyginti trumpus ir plačius kapiliarus, turinčius hidrofobinį vidinį paviršių, o ilgi, turintys hidrofilinį paviršių kapiliarai yra visiškai netinkami šiam metodui. Šį metodą taip pat taikė T. Tamura ir kiti (1998) nejoninių APM vandeninių tirpalų dinaminiam paviršiaus įtempio tirti, esant 2, 15 ir 40 °C temperatūrai, ir nustatė, kad jo vertę labiau lemia APM molekulės angliavandenilio grandinės ilgis nei temperatūra. Buvo pastebėtas tik nežymus temperatūros poveikis adsorbcijos kreivėms, kadangi didėjant temperatūrai visos kreivės buvo lygiagrečios mažesnei dinaminio paviršiaus įtempio vertei.

Vilgymas rodo, kaip pasklinda skystis, padėtas ant kieto (arba skysto) pagrindo. Gali būti 2 rūšių vilgymas: absoliutusias vilgymas, kai skystis stipriai

traukia kietąjį kūną, arba dalinis vilgymas, kai skystis nestipriai traukia kietąjį kūną.

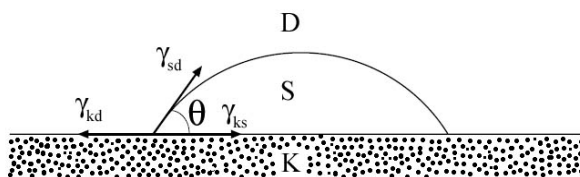
Vilgymo laipsnis išvedamas iš paviršiaus įtempio jėgų, veikiančių trijų fazių sąlyčio zonoje kieto kūno plokštumoje, pusiausvyros. Ši pusiausvyra aiškinama Young-Dupre lygtimi, pagal kurią pusiausvyroje esantis vilgymo kampas θ yra trijų sąlyčio įtempių funkcija (1.7 pav.) (Von Bahr 2003):

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{kd} - \gamma_{ks}}{\gamma_{sd}}, \quad (1.1)$$

čia γ_{kd} – įtempis kietos ir dujinės fazių sąlyčio zonoje;

γ_{ks} – įtempis kietos ir skystos fazių sąlyčio zonoje;

γ_{sd} – įtempis skystos ir dujinės fazių sąlyčio zonoje.



1.7 pav. Skysčio lašo ant kietojo kūno paviršiaus šoninis vaizdas. Rodomas vilgymo kampas ir įtempio jėgos, veikiančios trijų fazių sąlyčio zonoje (Von Bahr 2003):

D – dujinė fazė; S – skysta fazė; K – kietą fazė

Fig. 1.7. Side-view of a drop of liquid in contact with a solid surface. Illustrating the contact angle and tension forces acting on three-phase contact line (Von Bahr 2003):

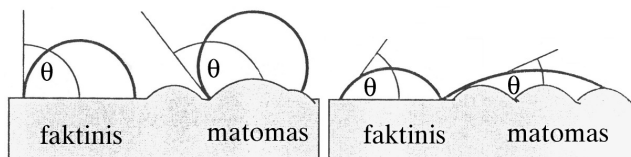
D – vapour phase; S – liquid phase; K – solid phase

Kai $\theta < 90^\circ$, kieta fazė vilgoma skystąja faze, o kai $\theta > 90^\circ$ – nevilgoma. Ribos $\theta = 90^\circ$ ir $\theta = 180^\circ$ apibūdina atitinkamai visišką vilgymą ir visišką nevilgymą. Mažos θ vertės bus gautos, kai skysčio paviršiaus įtempio vertė yra maža, kieto kūno paviršiaus energija yra didelė, o įtempis skystos ir kietos fazių sąlyčio zonoje yra mažas (Asthana *et al.* 2006).

Young-Dupre lygtis paremta idealių skysčių pusiausvyros termodinamika su tokiomis prielaidomis ir apribojimais (Lyklema 2000):

- paviršius yra plokščias ir inertiškas;
- visi sąlyčio įtempiai yra pastovūs;
- nepaisoma sunkio ir linijinio įtempio.

Vilgymo kampo θ matavimas ypač priklauso nuo kietojo kūno paviršiaus prigimties. Mikroskopiniai nelygumai ir trumpalaikis cheminio homogeniškumo nebuvimas gali skatinti pastebimą pokyčių atsiradimą nustatytoje vilgymo kampo vertėse. Taigi Young-Dupre lygtis tinka tik idealiems paviršiams, t. y. paviršiams, kurie yra chemiškai ir struktūriškai homogeniški. Pavyzdžiui, tikrieji paviršiai gali turėti mikroskopinių griovelių, briaunų, adsorbuotų plėvelių, oksiduotų, koroduotų arba dengtų plotų (Asthana *et al.* 2006). Paviršiaus nelygumų poveikis išmatuotai vilgymo kampo vertei pateiktas 1.8 paveiksle.



1.8 pav. Skysčio lašo ant nelygaus paviršiaus vilgymo kampas (Lyklema 2000)

Fig. 1.8. Contact angle of a drop of liquid onto rough surface (Lyklema 2000)

Autoriai (Gau and Zografi 1990) matavo nejoninių APM (pentaoksietileno dodecilmonoeteris ir pentaoksietileno decilmonoeteris) vandeninių tirpalų vilgymo kampus ant polistireno, polimetilmetakrilato ir parafino paviršių. Jie nustatė, kad, esant tam pačiam paviršiaus įtempiui, parafino vilgymas tiek APM tirpalais, tiek gryniaisiais skysčiais yra vienodas, o parafino paviršiaus vilgymas gryniaisiais skysčiais yra mažiau efektyvus, palyginti su polistireno ir polimetilmetakrilato paviršiais. Autoriai (Koopal *et al.* 1999) tyrė katijoninių APM koncentracijos ir pH poveikį vilgymo kampo, sudaryto ant kvarco pokštelės paviršiaus, vertei. Autoriai (Varadaraj *et al.* 1994), taikydami kapiliarinio skverbimosi vilgymo metodą, tyrė APM (tiesinės ir išsišakojusios angliavandenilio grandinės sulfatai, monodispersiniai etoksilatai ir monodispersiniai etoksisulfatai) struktūros poveikį derva dengto smėlio grūdelių vilgymo pokyčiui. Jie pastebėjo, kad angliavandenilio grandinės šakotumas padidina minėtų APM vilgymo greitį ir efektyvumą.

Vilgymas taip pat apibūdinamas terminu „sukibties darbas“, kuris išreiškiamas lygtimi:

$$W_{Ad} = \gamma_{sd}(1 + \cos\theta), \quad (1.2)$$

čia W_{Ad} – sukibties darbas;

γ_{sd} – įtempis skystos ir dujinės fazių sąlyčio zonoje;

θ – vilgymo kampas.

Didelė W_{Ad} vertė rodo gerą vilgymą, o maža – blogą. Kietasis kūnas gerai vilgomas skysčiu, kai skysčio paviršiaus įtempio vertė yra maža, o sukibties darbo tarp skysčio ir kieto kūno paviršių – didelė (Jenuševičienė 1967). Dažniausiai geras vilgymas nusako, kad tarp skysčio ir kieto kūno susiformuos stipri sukibtis arba ryšys (Asthana *et al.* 2006). Autoriai (Kaya *et al.* 2000), matuodami vilgymo kampą Vilhelmo pokštelės metodu, nustatė sukibties darbą tarp organinių skysčių ir skirtingo grunto (kaolinito ir bentonito) ir pastebėjo, kad jis priklauso nuo organinių skysčių paviršiaus įtempio (kohezijos jėgų) ir nuo sukibties jėgų skysčio ir grunto sąlyčio zonoje. Kai grunto dalelės yra suvilgytos vandeniui, organiniai skysčiai negali išstumti vandens molekulių ir pakeisti grunto mikrostruktūros. D. E. Packham (1996) siūlo ilgai naudotą vilgymo kampo matavimo metodą, reikalingą sukibties darbui nustatyti, pakeisti sąlyčio mechanikos eksperimentais, kuriems atlikti reikalingas paviršiaus jėgos aparatas.

Putodara yra pakankamai sudėtingas reiškinys, kuris nėra visiškai suprastas. Nors putos ir turi didelę praktinę svarbą, tačiau jų panaudojimo galimybės yra ribojamos dėl nepalankaus jų poveikio kai kuriems technologiniams procesams. Putos yra stambi dujų dispersija palyginti mažame skysčio tūryje. Tokia sistema dažniausiai neturi pusiausvyros, todėl jai reikalinga laikina stabilizacija. Ją galima atlikti naudojant APM arba nano daleles (Binks and Horozov 2005; Exerowa and Kruglyakov 1998). APM putodaros geba tiesiogiai priklauso nuo jos efektyvumo mažinti tirpalo paviršiaus įtempį, difuzinių rodiklių, savybių paskirstyti slėgį plonose plėvelėse ir elastinių savybių, kurias jos suteikia sandūroms (Myers 2006). Autoriai (Wang and Chen 2006) tyrė APM (dekstrino darinį) putodaros savybes. Pavyzdžiui, palyginti su kitais alkilpoliglikozidais, aukštesnysis alkoholis tiesiogiai reaguoja su poliglikozėmis, modifikuoti dekstrino dariniai rodo blogesnę putodaros gebą. Dekstrino darinį APM putodaros savybės buvo lyginamos su natrio dodecilbenzeno sulfonato ir oktilo fenolio etoksilo (Triton X-100) savybėmis. Nustatyta, kad junginys turi minimalią putodaros gebą. Autoriai (Girniene *et al.* 2000) tyrė joninių APM 0,5–3,0 % koncentracijų su 0,3 % kaulų klijų stabilizatoriumi, o C. D. Drummond ir D. Wells (1998) – nejoninių 1, 0,1, ir 0,01 % koncentracijų APM vandeninių tirpalų putodaros gebą, jie susidariusių putų aukštį matavo Ross-Miles (1941) būdu ir nustatė, kad išputojimas skiriasi nežymiai ir daugeliu atvejų gaunamos stabilios putos.

C. Neuberg (1916) padarė ypač svarbų atradimą: atrado hidrotropiją – blogai tirpstančių vandenyje medžiagų tirpumo didėjimą naudojant pakankamai didelės koncentracijos organinių rūgščių metalų druskas. Praskiestuose ir koncentruotuose APM tirpaluose tokios medžiagos turi skirtingą poveikį mikro- ir makroklampai, fazių sąlyčio temperatūrai ir APM tirpumui (Coffman and

Kildsig 1996). Autoriai (Gaevoi *et al.* 1991), naudodami magnetinio branduolių rezonanso ir elektronų paramagnetinio rezonanso spektroskopiją, tyrė natrio toluenosulfonato hidrotropijos vyksmo molekulinę prigimtį anijoninių APM (natrio dodecilsulfatas ir natrio alkylbenzenosulfonatas) micelių turinčiuose tirpaluose. Tirtas natrio toluenosulfonato poveikis anijoninių APM micelių struktūrai ir mikroklampai bei jų pralaidumas tirpiklio (vandens) molekulėms ir palyginti netirpiems organiniams substratams. Autoriai (González *et al.* 2000) tyrė sąveiką tarp nejoninės APM (etoksiluotas riebusis alkoholis, turintis penkis-šešis oksietileninius elementus) ir natrio p-tolueno sulfonato ir nustatė, kad hidrotropijos procesas priklauso nuo abiejų medžiagų koncentracijos. Hidrotropijos procesas prasideda esant tokiai natrio p-tolueno sulfonato koncentracijai, prie kurios jis pradeda savaime asocijuotis, tuomet atsiranda ir pastebimas APM micelių spindulio sumažėjimas. Atlikti rezultatai rodo, kad hidrotropijos efektas susijęs su vandens struktūros pokyčiais, kuriuos sukelia natrio p-tolueno sulfonato molekulės ir jų asocijuoti agregatai.

Fizikinis būvis – taip pat svarbi APM savybė. Kambario temperatūroje joninės APM dažniausiai yra amorfinės arba kristalinės kietosios medžiagos, o nejoninės APM – skysčiai arba pastos (López-Trosell 2005; Morrison 2006). Amorfinė kietojo kūno fizikinė būsena dažniausiai įgyja vaškinės pastos pavidalą. Tam tikroje temperatūroje joninės APM rodo staigų tirpumo padidėjimą. Ji žinoma kaip Krafto temperatūra (KT). KT – tai temperatūra, kuriai esant kristalai tirpsta sudarydami micelinį tirpalą arba skystą kristalinę dispersiją. Šioje temperatūroje APM tirpumas lygus jos KMK. Kai temperatūra yra aukštesnė už KT, bendras APM tirpumas staigiai didėja dėl micelių formavimosi, tačiau, esant žemesnei už KT temperatūrai, vyrauja tik APM monomerai, o tirpumas yra ribotas (Pandit *et al.* 1995; Cases *et al.* 2002).

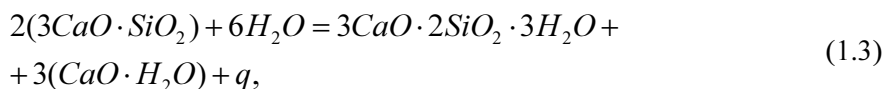
Skaidomumas mikroorganizmais – taip pat svarbi APM savybė. Autoriai (Azab *et al.* 2001; Řezníčková *et al.* 2002) tyrė nejoninių APM skaidomumą mikroorganizmais – vertino jų atskirų dalių koncentracijos pokytį ir nustatė, kad „pirminis“ skaidomumas per 10 dienų siekia 75–98 %.

APM cemento tešloje. Statybos srityje yra dažnos skirtingos smulkiadispersės sistemos (sudarytos iš dviejų ar daugiau fazių), tai dažniausiai įvairaus dispersiškumo suspensijos (tešlos) (Ivanauskas 2006). Priklausomai nuo cemento tešlas sudarančių sudedamųjų dalių kiekybinio santykio ir būsenos, jų savybės gali kisti nuo skysčių iki kietųjų kūnų savybių. Tyrinėjant tokias sudėtingas sistemas, susiduriama su tam tikrais sunkumais, nes joms negalima tiesiogiai taikyti skysčiams ar kietiems kūnams taikomų klasikinės fizikos arba mechanikos dėsnių (Nehdi and Rahman 2004).

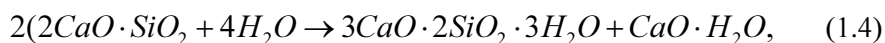
Mineralinėmis rišamosiomis medžiagomis vadinamos tokios medžiagos, kurios, sumaišytos su vandeniu, sudaro plastišką, savaime kietėjančią tešlą, kuri ilgainiui virsta kietu kūnu. Pagal kietėjimo sąlygas jos skirstomos į orinio (gipsas, kalkės) ir hidraulinio (cementai) kietėjimo neorganines rišamasias medžiagas. Orinio kietėjimo neorganinės rišamosios medžiagos kietėja tik ore, o hidraulinio – pradėjusios kietėti ore, toliau gali kietėti ir vandenyje (Deltuva *et al.* 1982).

Portlandcementis yra pagrindinė klasikinė hidraulinė rišamoji medžiaga, priskiriama iprastinių cementų grupei. Ši medžiaga gaunama smulkiai sumalus portlandcemenčio klinkerį su gipso priedu. Klinkeris gaunamas išdegus iki sukepimo smulkiai sumaltą vienalytį žaliavų mišinį, sudarytą iš klinties arba kreidos, molio ir koreguojančių priedų. Klinkerio kokybė ir techninės savybės priklauso nuo jo cheminės bei mineralinės sudėties ir nuo pagrindinių oksidų (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) ir kitų oksidų (MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 , SO_3) tarpusavio santykio (Martusevičius *et al.* 2002; Jesiukevičius *et al.* 1963).

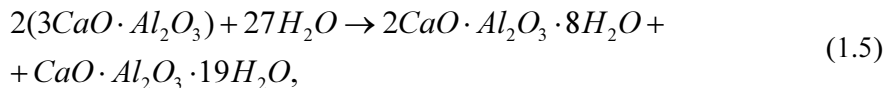
Pagrindiniai klinkerio oksidai nėra laisvi: degimo procese jie sudaro tam tikrus junginius. Svarbiausi klinkerio mineralai yra trikalčio silikatas ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), dikalcio silikatas ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), trikalčio aluminatas ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), tetrakalcio aliuoferitas ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ir gipsas (CaSO_4). Kietėjant portlandcemenčiui vyksta sudėtingi cheminiai ir fizikiniai reiškiniai. Klinkerio mineralai su vandeniu sudaro naujus hidratuotus junginius. Vieni ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ir ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) tiesiog prisijungia vandenį, o kiti – ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ir ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) jį prijungdami skyla. Pirmo tipo reakcijos vadinamos hidratacijos, o antro – hidrolizės (Deltuva *et al.* 1982). ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) lemia cemento tešlos stiprį ir patvarumą, tačiau ne taip gerai kaip ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). Per 28 paras hidratuojasi apie 70–80 % ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), jo hidratacijos metu išsiskiria ($\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$):



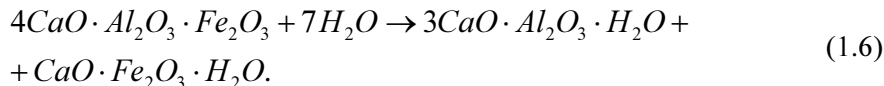
($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) lemia ilgalaikį cemento tešlos stiprį ir patvarumą, o jo hidratacijos procesas užtrunka ilgiau negu ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). Per 28 paras hidratuoja 30–50 % ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), pati hidratacija gali tęstis 5–6 metus, o hidrolizės procesas ne toks ryškus:



($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) lemia pirminį cemento tešlos kietėjimą ir stiprį, o jo hidratacijos greitis didesnis nei ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ar ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) hidratacijos metu vanduo sujungiamas ne tik chemiškai, bet ir fiziškai:



(4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃) turi palyginti mažą poveikį cemento tešlos savybėms, tačiau vyrauja, nes yra reikalingas klinkerio gamybos metu. Jo hidratacija vyksta lėčiau už (3CaO·Al₂O₃):



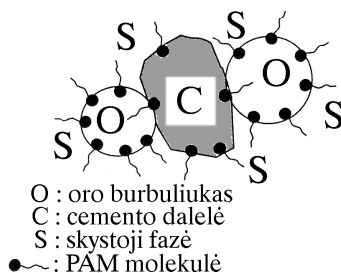
Portlandcementis yra ne tik skirtingų mineralų darinys, bet ir skirtingo dydžio cemento dalelių mišinys. Dėl to portlandcemenčio hidratacija ir kietėjimas yra sudėtingi procesai, kurių metu skirtingo dydžio dalelės hidratuojasi skirtingu greičiu, o mineralų hidratacijos procesai dengia vieni kitus (Martusevičius *et al.* 2002). Skystoje fazėje vyrauja katijonai (Ca²⁺, Al³⁺, Na⁺ ir K⁺) ir anijonai (OH⁻ ir SO₄²⁻) ir tam tikru laiko momentu kai kurie iš jų gali sudaryti didelius kiekius, o tai gali teigiamai arba neigiamai veikti oro įtraukimą ir APM putodaros gebą (Du and Folliard 2005). Autoriai (Corr *et al.* 2002) naudojo skenuojančią žemos temperatūros mikroskopiją, kad pavaizduotų oro tuštumas ankstyvoje cemento tešlos (V/K=0,4) hidratacijos stadijoje (5–30 min.) ir nustatė, kad kalcio jonai, esantys skystoje fazėje, mažina natrio oleato efektyvumą labiau nei natrio dodecilbenzolo sulfonato.

Reikėtų paminėti, kad cemento dalelių paviršiai turi krūvius ir daug laisvos paviršiaus energijos. APM molekulių adsorbcija ant cemento dalelių paviršiaus arba absorbcija į cemento dalelių paviršių ir į anksčiausiai susidariusius hidratacijos produktus tam, kad būtų galima sumažinti laisvą paviršiaus energiją, yra termodinamiškai labiau pageidaujama. Būtų puiku, jeigu galėtume išmatuoti APM adsorbcijos izotermes cemento tešloje, tačiau yra keletas veiksnių, kurie labai apsunkina šią užduotį (Du and Folliard 2005):

- dažniausiai yra naudojami kelių APM, turinčių skirtingas molekulinės mases ir adsorbciją, mišiniai;
- cemento hidratacija yra nenutrūkstamas procesas, kurio metu susidaro vis daugiau naujų kietųjų paviršių, o anksčiau susidarę paviršiai keičia savo savybes;
- per pirmąsias portlandcemenčio kietėjimo valandas jonų tipas ir koncentracija vandenyje pastoviai kinta per laiką. Ši tirpalo tūrio priklausomybė nuo laiko lemia kintamą adsorbcijos pusiausvyrą, todėl kiekybinis modelis yra nepraktiškas.

Vis dėlto autoriai (Zhang *et al.* 2001) tyrė katijoninių, anijoninių ir nejoninių APM adsorbcijos pobūdį ant portlandcemenčio dalelių paviršiaus ir nustatė, kad katijoninės ir anijoninės APM gali būti adsorbuotos, o nejoninės – ne. Tai rodo, kad yra svarbi elektrostatinė sąveika tarp APM ir portlandcemenčio dalelių. Zeta potencialo matavimai taip pat įrodo, kad katijoninės ir anijoninės APM gali būti adsorbuotos ant portlandcemenčio dalelių paviršiaus.

Kadangi APM molekulės yra adsorbuotos ant cemento dalelių ir užpildo paviršių, taip pat yra sąveika kietos, skystos ir dujinės fazių sąlyčio zonoje. Autoriai (Mielenz *et al.* 1958; Bruere 1955) stebėjo oro burbuliukų sukibtį su cemento dalelėmis. Cemento dalelių masė padeda disperguoti oro burbuliukus mišinyje ir mažina jų polinkį slinktis prie paviršių, o oro burbuliukų flotacijos jėgos mažina cemento dalelių nusėdimo galimybę ir greitį. Oro burbuliuko ir cemento dalelės sukibtis parodyta 1.9 paveiksle.

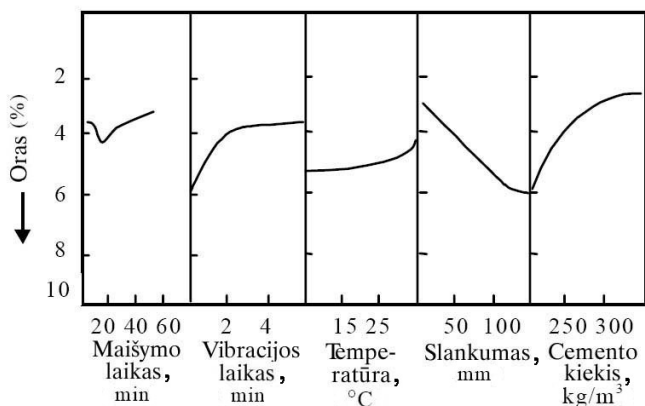


1.9 pav. Oro burbuliukų ir cemento dalelių sąveika (Du and Folliard 2005)

Fig. 1.9. Interaction between air bubbles and cement particles (Du and Folliard 2005)

Oro burbulų formavimas šviežiame betone sudaro naujas sandūras, o vykstant darbui (mechaninio maišymo forma) sistemai suteikiama laisvoji energija. Skystos ir dujinės fazių sąlyčio zonoje paviršiaus įtempio vertė yra lygi laisvosios paviršiaus energijos kiekiui ploto vienetu. Didesni APM kiekiai mažina paviršiaus įtempio vertes, taigi tikimasi, kad esant didesniam APM kiekiui bus ištrauktas didesnis oro tūris ir suformuoti patvaresni burbuliukai. Žinoma, maišymo pobūdis ir paties mišinio savybės taip pat lemia, kaip efektyviai darbas (maišymo forma) bus paverstas oro burbuliukų laisvąją paviršiaus energija. Svarbiausi veiksniai, lemiantys ištraukto oro kiekį, yra APM kiekis, stambaus ir smulkaus užpildo granulimetrinė sudėtis, mišinio slankumas ir temperatūra, portlandcemenčio cheminė sudėtis ir smulkumas, maišymo sąlygos. Pavyzdžiui, padidėjus portlandcemenčio smulkumui, padaugėja ir APM molekulių, adsorbuotų ant kietųjų paviršių, vadinasi, mažiau

jų įtraukiama į oro burbulų formavimą ir stabilizavimą. V. H. Dodson (1990) teigia, kad padidinus betono mišinio slankumą nuo 75 iki 150 mm, oro kiekis jame padidės, o jei slankumas bus didesnis nei 150 mm, didesni oro burbulai dėl plūdumo jėgų pasidarys mažiau stabilūs ir bendras oro kiekis betono mišinyje sumažės. Autorius taip pat nustatė, kad, betono temperatūrai padidėjus nuo 21 iki 38 °C, bendras oro kiekis mišinyje gali sumažėti iki 25 %, o temperatūrai sumažėjus nuo 21 iki 4 °C 40 %, gali būti įtraukta daugiau oro. Kai kurių technologinių veiksnių ir betono mišinio parametrų poveikis bendrajam oro kiekiui pateiktas 1.10 paveiksle.



1.10 pav. Betono mišinio parametrų poveikis bendrajam oro kiekiui (Mindess and Young 1981)

Fig. 1.10. Influence of concrete mixture parameters on total amount of air (Mindess and Young 1981)

Minėti autoriai tyrė sunkųjį betoną, o jų pasiūlytos teorijos ir prielaidos labiau taikytinos betonams, turintiems mažą įtraukto oro tūrį ir didelį kiekį stambių, didelio piltinio tankio užpildų. Tačiau paminėtina, kad panašūs procesai vyksta ir formuojant lengvuosius betonus, kurių atmaina yra porizuotas bei putų betonai. M. Sinica (2001) tyrė formavimo parametrų poveikį porizuoto betono (smėlio: portlandcementinio santykis – 3:1) tankiui ir nustatė, kad jį galima sumažinti iki 25 %, kai sudedamosios dalys 10 minučių maišomos su 0,04 % APM (sulfonolas su kaulų klijais). A. Laukaitis (2000) teigia, kad pagrindiniai technologiniai veiksniai, lemiantys putų cementbetonio, kurio rišamoji medžiaga yra portlandcementis, tankį, yra V/K ir APM kiekis. Mokslininkas pateikė tokią tankio priklausomybės nuo V/K ir putų kiekio lygtį:

$$\rho = 784 P_{\text{put}}^{-0.956} \cdot (V / K)^{0.141}, \quad (1.7)$$

čia ρ – tankis, kg/m^3 ;

P_{put} – putų kiekis, dm^3/kg .

Oro tuštumų formavimas yra dinaminis procesas, kurio metu susidaro nauji oro burbuliukai, o senesnieji suyra. T. C. Powers (1968) nagrinėjo, kaip maišymo metu yra formuojamos oro tuštumos betono mišinyje. Stebėdamas cemento tešlos ir užpildų judėjimą maišyklėje, jis nustatė, kad oro tuštumų formavimui yra būtinas maišyklės menčių sukūrinis judesys (plakimas) ir trimatis smulkaus užpildo košimas. Maišymo metu vietiniai kirpimo, gniuždymo, tempimo, sukimo ir tankinimo veiksmai yra veikiami visų mišinio sudedamųjų dalių ir jų kiekių, įskaitant ir esamas oro tuštumas. Visi šie veiksniai lemia oro burbuliukų kiekį ir jų dydžių pasiskirstymą.

Oro tuštumų formavimas betono mišinyje gali būti nagrinėjamas kaip dispergavimo ir kondensacijos procesų derinys. Dispergavimas pakeičia vientisą dujinės fazės tūrį į atskirus mažus oro burbuliukus. Maišymo režimas (įrangos konstrukcija, apsisukimų skaičius, maišymo trukmė ir kita) lemia šį dujų emulsijos procesą. Visos mišinio sudedamosios dalys sudaro trimatę sistemą, kuri lemia oro burbuliukų dydžių pasiskirstymą ir neleidžia susidaryti pastebimam didelių oro burbulų kiekiui. Laisva oro burbulų migracija mišinyje stabdoma sistemoje esančių kietųjų dalelių. Kondensacijos procesas yra tiesiogiai susijęs su tuo, jog oro tirpumas mažėja, kai mažinamas slėgis arba padidinamas kitų tirpmenų kiekis. Maišymo metu oras gali būti išlaisvintas iš vandens ir taip galima suformuoti mažus oro burbuliukus. Tuo pat metu smulkūs burbuliukai dėl maišymo metu sukkelto didelio vietinio slėgio gali skaidytis (Du and Folliard 2005).

Oro burbuliukai cemento tešloje iš prigimties yra nepatvarūs (CONSTRUCTION RESEARCH & TECHNOLOGY GMBH 2006). G. Fagerlund (1990) pateikė 3 mechanizmus, kurie gali sukelti oro tuštumų nestabilumą cemento tešloje. Sąlytis tarp disperguoto oro ir aplink jį esančios matricos turi laisvos paviršinės energijos, todėl yra termodinaminis polinkis mažinti sąlyčio paviršiaus plotą. Be to, visi oro burbuliukai turi egzistavimo trukmę. Jeigu cemento hidratacijos procesas yra smarkiai sulėtinamas, sukietėjusiam betone gali atsirasti mažų oro burbuliukų trūkumas. Kalbant apie putų patvarumą, galimi trys esminiai fizikiniai mechanizmai, kurie skatina oro burbuliukų suirimą (Myers 1999):

- oro difuzija iš mažesnio burbuliuko (didesnis vidinis slėgis) į didesnį (mažesnis vidinis slėgis) arba į aplink putas esančią dujų arba tirpalo tūrį;

- burbulo suirimas dėl kapiliarinės tėkmės, kuri skatina lamelinės plėvelės, esančios tarp gretimų burbulų, suirimą;
- staigus skysčio, esančio tarp burbulų, drenažas, skatinantis jų jungimąsi ir greitą suirimą.

1.2. Lengvieji betonai kaip kompozitinė medžiaga

Siekiant padidinti efektyvumą statybos sektoriuje, reikia dėmesį sutelkti į naujų statybinių medžiagų bei konstrukcijų, kurios tenkintų šiuolaikinius eksploatacinius reikalavimus, kūrimą ir gamybą. Jos turi būti pagamintos mažiausiomis žaliavų ir energijos sąnaudomis, naudojant vietines žaliavas ir pramonės gamybines atliekas. Šiuolaikinės technikos srityse (aviacijoje, laivų statyboje, mašinų gamyboje ir kt.) efektyviausiai naudojamos kompozitinės medžiagos – daugiakomponentės medžiagos, kurių savybės priklauso ne tik nuo komponentų santykio, bet ir nuo kiekvieno jų konkrečių savybių, tarpusavio sąveikos ir gamybos būdo. Kuriant bet kokią naują kompozitinę medžiagą neišvengiamai susiduriama su jos savybių prognozavimu. Vis dažniau kompozitinės medžiagos ir konstrukcijos naudojamos ir statyboje. Statybos srityje skirtų naudoti kompozitinių medžiagų kūrimo ir jų savybių prognozavimo teoriniai pagrindai plačiai nagrinėti daugelyje darbų (Marčiukaitis 1998; Barbero 1999; Kalamkarov and Kolpakov 1997; Chawla 1987; Daniel and Ishai 1994).

Atsižvelgiant į anksčiau pateiktą kompozitinės medžiagos apibrėžimą galima teigti, kad betonai, nesvarbu, ar jis yra sunkusis, ar lengvasis, yra kompozitinė medžiaga, kurioje smulkus, stambus arba poringas užpildas bei oro tuštumos yra intarpai, o juos jungiantys sukiestę cemento mineralų hidratacijos produktai (hidrosilikatai) – matrica.

Lengvasis betonai jau daugelį metų sėkmingai naudojamas įvairiose statinių konstrukcijose. Šiuo atveju lengvojo betono konstrukcinis efektyvumas yra svarbesnis rodiklis nei vien tik jo stiprumo rodiklių analizė. Sumažintas konstrukcijos tankis mažina jos savitąjį svorį, statinio pamatų dydį, konstrukcijos savikainą ir didina darbų našumą (Rossignolo and Agnesini 2002).

Pagal tankį lengvieji betonai skirstomi į (Naujokaitis 2007):

- labai lengvus termoizoliacinius, kurių tankis siekia iki 500 kg/m^3 ;
- lengvuosius, kurių skiedinys porizuotas, o tankis ne mažesnis kaip 800 kg/m^3 ir ne didesnis kaip 1200 kg/m^3 ;
- lengvuosius, kurių tankis ne mažesnis kaip 800 kg/m^3 ir ne didesnis kaip 2000 kg/m^3 , o šie dar gali būti:

- konstrukciniai–termoizoliaciniai, kurių tankis ne mažesnis kaip 800 kg/m^3 ir ne didesnis kaip 1400 kg/m^3 ;
- konstrukciniai, kurių tankis ne mažesnis kaip 1400 kg/m^3 ir ne didesnis kaip 2000 kg/m^3 .

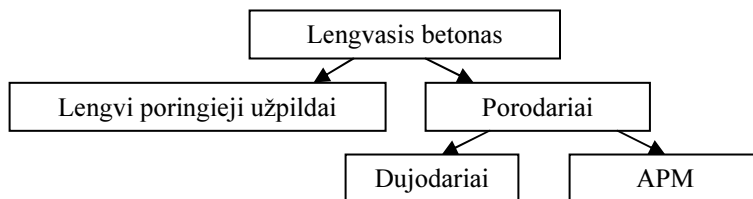
Pagal kietėjimo sąlygas lengvieji betonai skirstomi į:

- autoklavinius, kurie kietinami didesnio slėgio (iki $1,6 \text{ MPa}$) ir aukštesnės temperatūros (iki 203°C) sočiuose vandens garuose;
- beautoklavinius, kurie dar gali būti skirstomi į:
 - šutintus, kurie kietinami atmosferinio slėgio ir $65\text{--}95^\circ \text{C}$ temperatūros vandens garuose;
 - natūraliai sukietėjusius, kurie kietėja natūraliomis sąlygomis, bet ne mažesnėje kaip 18°C temperatūroje.

Pagal rišamąją medžiagą aktyieji betonai skirstomi į:

- silikatbetonį, kurio gamybai naudojamos statybinės kalkės arba mišri kalkių ir cemento rišamoji medžiaga. Joje yra ne mažiau kaip 50 % kalkių;
- cementbetonį, kurio gamybai naudojamas cementas arba mišri cemento ir kalkių rišamoji medžiaga, kurioje yra ne mažiau kaip 50 % cemento;
- polimerbetonį, kurio gamybai naudojamos polimerinės rišamosios medžiagos.

Sumažinti betono tankį galima naudojant lengvus poringuosius užpildus, porodarius, kurie užtikrina tuštumų susidarymą, arba naudojant šiuos abu būdus kartu. Galimi skirtingi lengvojo betono gamybos būdai pateikti 1.11 paveiksle.



1.11 pav. Lengvojo betono gavimo būdai

Fig. 1.11. Obtaining ways of lightweight concrete

Lengvieji betonai, gauti naudojant poringuosius užpildus. Lengvieji poringi užpildai gali būti natūralūs ir sintetiniai (arba ruošiami specialiai). Didžiausia tokių užpildų problema yra labai didelis jų vandens įgėris. Kai kurie užpildai, ypač tie, kurie gaminami degimo krosnyse, gali turėti palyginti

nepralaidų ir sandarų paviršių. Tie užpildai, kurie betono mišinyje naudojami kaip trupinta medžiaga, ypač natūralios medžiagos, gali įgerti 20 % ir daugiau vandens skaičiuojant nuo jų pradinės masės. Tokiu atveju maišymo, transportavimo ar klojimo metu vandens kiekis betono mišinyje staigiai sumažės ir jis neteks technologiskumo (Day 1999).

Labiausiai paplitę natūralūs lengvieji užpildai yra pempza, šlakas ir vulkaninis tufas. Šie užpildai yra porėtos, turinčios slidų paviršių medžiagos, gaunamos iš vulkaninės kilmės uolienų. Visos šios medžiagos pirmiausia skiriasi porų struktūra. Pempzą sudaro tarpusavyje besijungiančių vamzdelio formos tuštumų tinklas, šlake yra daugiau sferinių tuštumų, o vulkaninį tufą (suformuotą iš tarpusavyje sujungtų vulkaninių pelenų) sudaro netaisyklingų porų struktūra. Norint gauti reikiamą granuliometrinę sudėtį, šias medžiagas galima trupinti ir sijoti.

Natūralūs lengvieji užpildai, minėti anksčiau, turi ribotą geografinį paplitimą, todėl šiuo metu daugiausiai yra gaminami lengvieji betonai arba su specialiai paruoštomis natūraliomis, arba su sintetinėmis medžiagomis. Labiausiai iš jų paplitusios yra keramzitas ir skalūnas, nes žaliavos šiems užpildams gaminti yra lengvai prieinamos daugelyje plotų. Žaliavos yra arba trupinamos iki norimo dydžio, arba malamos ir granuliuojamos, o po to kaitinamos iki 1000–1200 °C temperatūros, kol išsipučia. Pūtimosi procesas vyksta dėl žaliavoje esančio mažo kiekio organinių priemaišų, kurios degdamos išskiria dujas. Priemaišų žaliavoje gali būti natūraliai arba jų pridėdama papildomai. Po degimo proceso galutinis produktas gali būti trupinamas ir sijojamas, kad būtų pasiekta norima granuliometrinė sudėtis.

Pūstas krosnių šlakas yra gaminamas iš krosnių išeinantį apie 1500 °C temperatūros šlako lydalą veikiant reguliuojamu vandens kiekiu arba garais ir suspaustu oru, taip akumuliuojami garai šlako lydale. Tai suteikia šlakui porėtą struktūrą, panašią į pempzos. Norint gauti reikiamą jo granuliometrinę sudėtį, jis taip pat gali būti trupinamas ir sijojamas. Jei šlako lydalas yra išpūstas naudojant vandenį besisukančiame būgne, o po to pro jį praleistas oro srautas, gaunamas granuliuotas pūstas šlakas, kurio tankis yra mažesnis palyginti su pūstu šlaku.

Aglomeruoti lakieji pelenai yra gaminami iš anglių dulkių degimo metu susidarantių lakiųjų pelenų, į kuriuos įpilamas tam tikras kiekis vandens ir šis mišinys granuliuojamas bei degamas 1200 °C temperatūroje. Ši temperatūra nėra tokia aukšta, kad galutinai išlydytų daleles, tačiau leidžia lakiesiems pelenams sudaryti didesnius junginius. Porėta struktūra gaunama dėl vandens, naudojamo lakiesiems pelenams granuliuoti, garavimo ir anglies pašalinimo degimo metu.

Perlitas yra vulkaninis stiklas, į kurio sudėtį įeina 2–6 % vandens. Kai jis staigiai kaitinamas iki 1800 °C temperatūros, vanduo atsiskiria nuo mineralo struktūros ir susidarę garai mineralo viduje suformuoja porėtą struktūrą. Gaunamas labai mažo tankio gaminys.

Vermikulitas yra sluoksnuotos struktūros molio mineralas. Kai jis yra kaitinamas iki 1000 °C, tarp sluoksninis vanduo virsta garais ir gaunama išpūsta struktūra, kurios tūris, palyginti su pradiniu medžiagos tūriu, yra didesnis daugiau nei 30 kartų.

Medžio pjuvenos jau daugelį metų naudojamos kaip lengvas užpildas gaminiuose, tokiuose kaip plytos ir blokai. Dėl medžio pjuvenose esančio cukraus, taninų ir kitų organinių junginių, galinčių lemti portlandcemenčio kietėjimą ir hidrataciją ir jo patvarumą, medžio pjuvenos turi būti apdorotos taip, kad šie žalingi poveikiai išnyktų. Net ir tada suvilgytos medžio dalelės turi polinkį brinkti, o tai gali skatinti plyšių atsiradimą jas dengiančiame cemento.

Polistireninio putplasčio (PPS) granulės, kurių dydis yra apie 4 mm, dėl brangios gamybos bei sunkaus įterpimo į betoną naudojamos tik termoizoliaciniuose betonuose specialiose konstrukcijose (Alexander and Mindess 2005).

Lengvieji betonai, gauti naudojant porodarius. Porodariai – homogenizuojamo mišinio įmaišos, sudarančios sferines poras ir mažinančios gaminių tankį. Lengvojo betono aktyumas yra didesnis nei 6 % tūrio. Lengvieji betonai, kurių aktyumas naudojant porodarius yra didesnis nei 15 % tūrio, vadinami aktyvaisiais betonais (Laukaitis 2000). Betono tankis gali būti mažinamas porodariais dviem būdais:

- naudojant dujodarius;
- naudojant APM.

Dujodariai – įmaišoma į homogenizuojamą mišinį medžiaga, kuri, reaguodama su rišamąja medžiaga, išskiria dujas, sudarančias mišinyje ir gaminiuose sferines poras. Tokiu būdu betoną Prahoje pirmą kartą pagamino E. Hofmann (1889). Jis į plastiškąjį cemento ir gipso skiedinį įmaišė druskos rūgšties ir natrio bikarbonato. Vykstant cheminei reakcijai išsiskyrė CO₂ dujos, kurios sukietėjusiam mišinyje sudarė poringą struktūrą. Šiuo metu plačiausiai naudojamas dujodaris yra aliuminio milteliai (pudra). Ji reaguodama su kalkėmis išskiria vandenilį:



Užmaišytame su vandeniu formavimo mišinyje vyksta rišamosios medžiagos hidrolizė ir hidratacija bei jos metu susidariusio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reakcija su aliuminio pudra, kurios metu, veikiant vandeniui, išsiskiria H_2 dujos. Išsiskyrusios H_2 dujos formuoja poringąją gaminio struktūrą, o dėl susidariusių hidratacijos produktų mišinys įgauna plastiškąją stiprį. Šiuos procesus reikia valdyti taip, kad jie atitiktų vienas kitą. Jeigu rišamosios medžiagos hidratacija įvyks anksčiau, negu pasibaigs dujų išsiskyrimas, bus suardyta susidariusi gaminio makrostruktūra, o jeigu dujų išsiskyrimas baigsis anksčiau, negu formavimo mišinys įgaus reikiamą plastiškąją stiprį, jis suslūgs.

Intensyviai plakant tam tikros rūšies ir koncentracijos APM vandeninį tirpalą, gaunamos putos, kurios, sumaišytos su kitomis mišinio sudedamosiomis dalimis, leidžia sukietėjusiam gaminyje gauti akytą medžiagos struktūrą. Putos gaunamos dėl APM gebėjimo mažinti vandens paviršiaus įtempį. Pirmą kartą sumaišyti rišamąsias medžiagas su putomis ir tokiu būdu pagaminti betoną pasiūlė danų inžinierius E. C. Bayer (1924). Pagrindiniai putų rodikliai yra išputojimo laipsnis ir stabilumas, kurie priklauso nuo APM rūšies ir jų koncentracijos vandeniniame tirpale. Išputojimu vadinama putų išeiga, t. y. gautų putų tūrio ir APM tirpalo tūrio santykis. Putų stabilumas – tai gebėjimas kuo ilgiau išlaikyti nepakitusių pradinį savo tūrį. Jis priklauso nuo skysčio ištekejimo iš putų plėvelių greičio, putų tankio, oro burbuliukų skersmens, putų plėvelės storio, jų sudėties ir struktūrinio–mechaninio stiprio, taip pat putų elastingumo savybių (Laukaitis and Sinica 2006). Daugelis mokslininkų tyrė natūralias ir sintetines APM (Valore 1954; Taylor 1969; Perez and Cortez 1997; Laukaitis *et al.* 2005; Park *et al.* 1998).

1.3. Lengvųjų betonų savybės

Lengvojo betono gaminių savybės skirstomos į fizikines (tankis, tamprumo modulis, makro- ir mikrostruktūra, džiūstamasis susitraukimas ir kt.), mechanines (gniuždomasis, lenkiamasis ir tempiamasis stipriai ir kt.) ir eksploatacinės (higroskopinė sorbcija, šilumos laidumas, degumas, garso izoliacija, atsparumas šalčiui ir kt.).

Fizikinės savybės. Lengvojo betono tankis gali būti jo mišinio arba sukietėjusio bandinio. Mišinio tankis reikalingas jo sudėčiai kontroliuoti gamybos metu. Autoriai (Regan and Arasteh 1990) teigia, kad teorinės lygtys mišinio tankiui nustatyti nėra tikslios dėl rezultatų sklaidos, kurią lemia daugelis veiksnių, tokių kaip oro tuštumų tūrio didėjimas arba mažėjimas joms susidarant ir yrant mišinio gamybos metu. Daugelis lengvojo betono fizikinių

savybių priklauso būtent nuo suketėjusio bandinio tankio. Nustatant lengvojo betono tankį, turi būti nurodytos bandinių kondicionavimo sąlygos, nes skirtingų lengvųjų betonų tų pačių savybių lyginimas, neturint aiškaus jų išdžiovinimo laipsnio, gali būti mažai reikšmingas (Valore 1954). F. C. McCormick (1967) tyrė smulkaus užpildo rūšies, jo granulimetrinės sudėties, smėlio ir cemento santykio poveikį lengvojo betono nekondicionuotų bandinių tankiui ir nustatė, kad, parenkant sudėtį pagal kietųjų medžiagų tūrį, jis skiriasi nuo projekcinio tankio ne daugiau kaip 5 %. Tiriant lengvojo betono bandinius iš cemento ir smėlio, nustatyta, kad pakeitus dalį smėlio lakiaisiais pelenais, galima sumažinti jų tankį ir padidinti stiprį (Durack and Weiqing 1998). Reikiamas lengvojo betono tankis, panaudojus lakiuosius pelenus, gaunamas dėl mažesnio jų savitojo tankio, palyginti su smėliu, todėl galima mažinti reikalingą oro tuštumų tūrį, kuris ir lemia didesnį tokio betono bandinių stiprį (Nambiar and Ramamurthy 2006).

Lengvųjų betonų, kurių tankis kito 500–1500 kg/m³ ribose, gautų panaudojus porodarius, tamprumo modulis yra pastebimai mažesnis, palyginti su tokio paties tankio betonais, kuriuose panaudoti lengvi, poringi užpildai (Jones and McCarthy 2005).

Struktūra (mikro- ir makro-) – taip pat svarbi lengvojo betono fizikinė savybė, lemianti jo bandinių daugelį mechaninių ir eksploatacinių savybių. Daugelį betono, turinčio lengvų poringų užpildų, mechaninių savybių lemia sukibimo stipris užpildų ir rišiklio kontakto zonoje ir individualios užpildo savybės (Marčiukaitis 1998). R. Žurauskas (2002) nustatė, kad lengvojo betono su sferinės formos, lygaus paviršiaus ir didesnio skersmens PPS užpildais mechaninės savybės yra blogesnės, palyginti su tokio paties tankio betonu, kuriame panaudoti netaisyklingos formos, mažesni, turintys nelygų paviršių PPS užpildai. Akytuose betonuose maža oro tuštumų skersmens sklaida lemia didesnį jo stiprį. Esant didesniam oro tuštumų kiekiui, jos pradeda jungtis, susidaro didelė jų skersmens sklaida, kuri lemia mažesnę akytojo betono stiprį. Oro tuštumų formos įvairiapusiškumo poveikis lengvojo betono stipriui yra nereikšmingas (Wee *et al.* 2006; Kearsley and Visagie 1999; Nambiar and Ramamurthy 2007). Dujų betone dujų formavimosi metu susidaro elipsės formos poros (Cabrillac *et al.* 2006). Susisiekančių ir bendro porų skaičiaus santykis putų betone yra mažesnis, palyginti su dujų betonu (Laukaitis and Fiks 2006). Dėl šios priežasties putų betone yra mažesnė vandens ir garso absorbcija, palyginti su dujų betonu. Didesnis oro tuštumų tūris lemia plonesnes tarpporines sienes, kartu ir mažesnę rišiklio tūrį, todėl mažėja gaminio džiūstamasis susitraukimas (Tada and Nakano 1983).

Putų betonas, kuriame nėra užpildų, turi didelį džiūstamąjį susitraukimą. Jis 10 ir daugiau kartų didesnis už normalaus tankio betono džiūstamąjį

susitraukimą (Valore 1954; Jones *et al.* 2003). Autoklavinis kietinimas gali pastebimai sumažinti džiūstamąjį susitraukimą dėl vykstančių minerologinės sudėties pokyčių (Valore 1954; Schubert 1983). Lengvojo betono džiūstamasis susitraukimas mažėja, mažėjant jo bandinių tankiui (Jones *et al.* 2003; Schubert 1983). Šį susitraukimą lemia mažo tankio bandiniuose esantis mažesnis rišiklio kiekis. Autoriai (Regan and Arasteh 1990; Weigler and Karl 1980) nustatė, kad lengvojo betono džiūstamąjį susitraukimą galima sumažinti panaudojus lengvus užpildus.

Mechaninės savybės. Lengvojo betono gniuždomasis stipris mažėja proporcingai mažinant jo tankį (Kearsley 1996). Bandinio dydis ir forma, porų rišiklyje ar užpilduose pobūdis, apkrovos kryptis ir greitis, vandens kiekis, naudotų žaliavų savybės ir bandinių kietinimo sąlygos bei trukmė lemia lengvojo betono stiprį (Valore 1954). Lengvojo betono tankiui kintant 500–1000 kg/m³ ribose, gniuždomasis stipris mažėja, didėjant oro tuštumų skersmeniui. Kai betono tankis yra 1000 kg/m³ ir daugiau, oro tuštumos negali lemti gniuždomojo stiprio, nes jis priklauso nuo formavimo mišinio sudėties (Visagie and Kearsley 2002). Neįprasta lengvojo betono fazinė prigimtis lemia, kad nedidelis V/C pokytis, priešingai nei tiriant įprastą betoną, neturi poveikio stipriui (Jones and McCarthy 2006). Tokiame betone (iki tam tikrų jo konsistencijos ir stabilumo ribų) didinant V/C, stebimas stiprio didėjimas (De Rose and Morris 1999; Tam *et al.* 1987).

Atlikti tyrimai rodo, kad, esant tam pačiam lengvojo betono tankiui, jo stipris naudojant smulkesnį smėlį yra didesnis, palyginti su stambesniu. Taip yra dėl tolygaus porų pasiskirstymo naudojant smulkesnį smėlį. Naudojant stambesnį smėlį gautos poros buvo didesnio skersmens ir netolygiai pasiskirsčiusios bandinio tūryje (Nambiar and Ramamurthy 2006; McCormic 1967). Lengvųjų betonų lenkiamojo ir gniuždomojo stiprių santykis kinta 0,25–0,35 ribose (Valore 1954). Lengvųjų betonų, gautų panaudojus porodarius tempiamasis stipris yra mažesnis, palyginti su betonais, kuriuose panaudoti lengvi, poringi užpildai (Jones and McCarthy 2005).

Eksploatacinės savybės. Lengvųjų betonų vandens absorbcija mažėja mažėjant bandinių tankiui dėl juose esančio mažesnio rišiklio kiekio ir kartu mažesnio kapiliarinių porų tūrio jame. Vandens absorbciją lengvajame betone lemia rišiklio ir užpildo savybės, tačiau ne visos poros dalyvauja vandens absorbcijos procese, nes ne visos jos tarpusavyje susisiečia (Nambiar and Ramamurthy 2006; Kearsley and Wainwright 2001). Pastebėta, kad putų betono deguonies ir vandens garų laidumas didėja, didėjant jo poringumui (Kearsley and Booyens 1998). Lengvojo betono vandens garų laidumo koeficientas yra

proporcingas svorio vienetui ir atvirkščiai proporcingas porų santykiui (Byun *et al.* 1998).

Drėgmės migracija poringose medžiagose apibūdinama lengvai nustatoma savybe, vadinama sorbcija (vandens įgėrimas ir perdavimas kapiliarais), kuri paremta nesočiųjų srautų teorija (Hall 1989; Wilson *et al.* 1991). Nustatyta, kad vandens garų perdavimo savybė geriau paaiškinama sorbcija nei laidumu. Lengvojo betono sorbcijos vertė mažėja didėjant porų tūriui (Hall 1989; Wilson *et al.* 1991; Nambiar and Ramamurthy 2007). Taip pat nustatyta, kad tokio betono sorbcijos rodikliai priklauso nuo užpildo rūšies, porų struktūros ir skvarbos pobūdžio (Jones and McCarthy 2005).

Mažo tankio lengvasis betonas, atsižvelgiant į jo absorbciją, jos greitį ir pirminį skverbimosi gylį, turi gerą atsparumą šalčiui – po 150 šaldymo–atšildymo ciklų, gniuždomasis bandinių stipris didėja 2,8–33,9 %, palyginti su kontroliniais bandiniais (Jones 2001; Tikalsky *et al.* 2004). Autoriai (Jones and McCarthy 2005) taip pat tyrė lengvojo betono atsparumą sulfatams 12 mėn. ir nustatė, kad jis turi gerą atsparumą cheminiam poveikiui. Pagreitinti chloridų skvarbos tyrimai rodo, kad lengvojo betono rodikliai yra tokie pat kaip ir normalaus betono. Didesnis atsparumas korozijai nustatytas mažesnio tankio bandiniuose (Kearsley and Booyens 1998). Lengvojo betono struktūra ir esamas poringumas nebūtinai daro jį mažiau atsparų drėgmės skverbimuisi nei tankus betonas. Oro tuštumos veikia kaip barjeras, stabdantis greitą jos skvarbą.

1.4. Kompozitinės medžiagos su polistireninio putplasčio tarpais

PPS – tai mažo tankio patvarios putos, turinčios polimerinėje matricoje tam tikrų oro tuštumų (Chen and Liu 2004). PPS granulės gaminamos iš PS pusgaminio, kuriame yra dujų – izopentano. Granulės išsipučia 90–120 °C temperatūroje. Galimi šie PPS gamybos būdai: veikiant žaliavą karštu vandeniu, garais, karštu oru arba aukšto dažnio elektros srove (Павлов 1973). PPS plokštės gaminamos vienos stadijos arba dviejų stadijų būdu. Šiuolaikinės normos (LST EN 13163:2003/AC:2006) reikalauja, kad PPS gaminiai būtų tikslių matmenų, turėtų vienodas šilumos izoliacines savybes visame plokštės tūryje ir t.t. Todėl dažniausiai naudojamas dviejų stadijų gamybos būdas, kai šilumos agentas yra vandens garai. Šią gamybos technologiją sudaro pirminis žaliavos išpūtimas, išpūstų granulių stabilizacija silosuose ir galutinis parinktų matmenų gaminio formavimas. Pirminį žaliavos išpūtimą galima atlikti su

dviejų tipų įrangą: diskretaus ir nenutrūkstamo veikimo (Куртц and Шеллер 1999).

Kompozitinės medžiagos su PPS intarpais tyrimai prasidėjo dar 1973 metais, kai D. J. Cook (1973) ištyrė PPS kaip užpildą betonui. Šiuo metu kompozitines medžiagas, kurių intarpai yra PPS, galima naudoti tokiuose konstrukciniuose elementuose, kaip atitvarų plokštės, atitvarų sienos, kompozitinės perdengimo sistemos, laikantieji betono blokai, medžiaga kelių dangos pasluoksniui, plūduriuojančios jūrinės konstrukcijos ir t.t. (Perry *et al.* 1991; Bagon and Frondistou-Yannas 1976; Ravindrarajan and Tuck 1994; Babu, K. G. and Babu, D. S. 2003; Sussman 1975). Tačiau intarpai iš PPS turi ir du trūkumus, kurie riboja jų panaudojimą ir populiarumą: (1) jie yra ypač lengvi, tankis siekia tik $12\text{--}20\text{ kg/m}^3$, todėl maišymo metu jie gali plūduriuoti mišinio paviršiuje, dėl to PPS intarpai blogai pasiskirsto visame kompozito formavimo mišinio tūryje ir jis gali išs sluoksniuoti ir (2) jie yra hidrofobiniai – blogai dengiasi cemento tešla, todėl reikalingas jų paviršiaus cheminis apdorojimas (Chen and Liu 2004).

Minėtas problemas skirtingi autoriai sprendė įvairiai. B. Chen ir J. Liu (2007) tyrė kompozitinių medžiagų su 3,0 ir 8,0 mm dydžio PPS intarpais mechanines savybes. Sukibimą tarp matricos ir minėtų intarpų jie gerino stireno–butadieno gumos lateksu. Gniuždomasis ir lenkiamasis stipris didėja, kai cemento ir minėto polimero santykis kompozite neviršija atitinkamai 5–10 % ir 10–15 %. Toliau didinant polimero kiekį, kompozitinės medžiagos bandinių stiprumo rodiklių vertės pradeda mažėti. Tie patys autoriai (Chen and Liu 2004) dalį smulkaus ir stambaus smėlio intarpų kompozitinėje medžiagoje keitė anksčiau minėto dydžio PPS intarpais, sukibimui tarp jų ir matricos pagerinti naudojo smėlio dulkes ir gavo lengvą $800\text{--}1800\text{ kg/m}^3$ tankio kompozitinę medžiagą, kurios gniuždomojo stiprio vertės kito $10\text{--}25\text{ MPa}$ ribose. K. G. Babu ir D. S. Babu (2003) tyrė $1500\text{--}2000\text{ kg/m}^3$ tankio kompozitinę medžiagą, kurioje taip pat naudojo smėlio dulkes (3, 5 ir 9 % skaičiuojant nuo matricos masės) ir superplastiklį (naftalino pagrindu), kad pagerintų sukibimą su 6,3 ir 4,8 mm dydžio PPS intarpais, ir nustatė, kad jos gniuždomasis stipris gali kisti $10\text{--}21\text{ MPa}$ ribose. Jis pastebimai didėja mažinant PPS intarpų dydį arba didinant smėlio dulkių kiekį kompozitinės medžiagos mišinyje. Autoriai (Ravindrarajah and Tuck 1994) tyrė kompozitinės medžiagos, kurioje panaudoti chemiškai apdoroti (polivinilo propionato vandeniniu tirpalu) PPS intarpai, stiprį, standį ir cheminį atsparumą. Jie nustatė, kad, esant pastoviam kompozitinės medžiagos tankiui, minėtas savybes lemia V/C. R. Le Roy ir kiti (2005) tyrė kompozitinės medžiagos, sudarytos iš ypač stiprios matricos (gnuždomasis stipris 180 MPa) ir 1, 3 ir 6 mm dydžio PPS intarpų, gniuždomąjį stiprį. Matricą sudaro CEM I 52,5 markės cementas,

smėlio dulkės, kvarcinis smėlis (maksimalus skersmuo 400 μm) ir superplastiklis polikarboksilato pagrindu. Autoriai, siekdami išvengti oro tuštumų susidarymo matricoje, naudojo chemiškai neapdorotus PPS interpus. Tyrimų rezultatai rodo, kad kompozitinės medžiagos gniuždomasis stipris priklauso nuo PPS interpų dydžio. Kuo jis mažesnis, tuo didesnės gaunamos kompozitinės medžiagos gniuždomojo stiprio vertės. D. S. Babu ir kiti (2006) tyrė 1000–1900 kg/m^3 tankio kompozitinę medžiagą, kurioje kaip tarpai naudotos PS ir PPS granulės. Kaip papildoma rišamoji medžiaga šiose medžiagose buvo naudojami lakieji pelenai. Autoriai nustatė, kad esant panašiam PS ir PPS interpų dydžiui bei kompozitinės medžiagos tankiui, jos bandinių gniuždomasis stipris naudojant PS interpus yra 70 % didesnis, palyginti su bandiniais, kuriuose panaudoti PPS tarpai. Kompozitinėje medžiagoje, kurioje yra didesnis tūris didesnio skersmens PPS interpų, vandens garų laidumo ir sorbcijos vertės yra didesnės. Autoriai (Babu *et al.* 2005) kompozitinės medžiagos, kurios tankis kito 550–2200 kg/m^3 ribose, gamybai kaip papildomą rišamąją medžiagą taip pat naudojo lakiuosius pelenus (50 % nuo cemento masės) ir 6,3 bei 4,8 mm dydžio PPS interpus. Sukibimui tarp kompozitinės medžiagos sudedamųjų dalių pagerinti jie naudojo plastifikatoriaus (naftalino pagrindu) ir orą įtraukiančio priedo mišinį. Autoriai nustatė, kad kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo ir tempiamojo stiprio bei tamprumo modulio vertės mažėja, didinant PPS interpų kiekį juose. H. Guan ir kiti (2007) tyrė kompozitinės medžiagos su PPS tarpais elektromagnetinių bangų atspindį mikrobangų juostoje, kintančioje 8–18 GHz ribose. Autoriai naudojo 1 ir 3 mm dydžio PPS interpus bei polivinilo alkoholį kaip rišiklį, užtikrinantį gerą sukibimą tarp minėtų interpų ir matricos. Rezultatai rodo, kad PPS tarpai gali žymiai pagerinti elektromagnetinių bangų atspindį. PPS interpų dydis, jų kiekis ir bandinio storis lemia elektromagnetinių bangų atspindį. Kai PPS interpų dydis yra 1 mm, o jų tūris bandinyje sudaro 60 %, atspindys yra ne mažesnis nei 8 dB, mikrobangų juostai kintant 8–18 GHz ribose.

PPS interpų hidrofilizavimui panaudojus visus anksčiau minėtus priedus gaunamos kompozitinės medžiagos tankis yra gana didelis (kinta 2200–550 kg/m^3 ribose). Norint gauti kompozitinę medžiagą, kurios tankis būtų mažesnis negu 500 kg/m^3 , reikia ne tik hidrofilizuoti PPS interpus, bet ir suformuoti oro tuštumas kompozitinės medžiagos matricoje. Dar 1989 m. (Makapeč *et al.* 1989) gaminant kompozitinę medžiagą su PPS tarpais bandyta panaudoti klampus putas iš muiluotos medžio dervos ir kalkių teslos. Tačiau šis būdas buvo visiškai netechnologiškas. Vienas iš naujesnių būdų, taikytų mūsų šalyje atliekant mokslinius tyrimus, yra papildomas trupintų PPS interpų hidrofilizavimas 2 % sulfonolo ir 0,3 % kaulų klijų vandeniniu tirpalu

(Laukaitis *et al.* 2005). Autoriams pavyko gauti $150\text{--}310\text{ kg/m}^3$ tankio kompozitinę medžiagą, kurios gniuždomojo stiprio vertės kinta $0,25\text{--}0,75\text{ N/mm}^2$, o šilumos laidumo koeficiento – $0,061\text{--}0,095\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ribose. Tačiau minėtame darbe naudoti trupinti PPS intarpai buvo chaotiškos formos, o rezultatai daugiau taikyti palyginimui su sferiniais PPS intarpais.

V. I. Mielichovas ir kiti (В. И. Мелихов *et al.* 1997) teigia, kad norint gauti ypač lengvus PPS intarpus kompozitinei medžiagai, reikia naudoti žaliavą, kurios grūdėliai yra didesni nei $0,9\text{ mm}$. Taip pat būtina sąlyga, kad intarpai būtų pučiami tris kartus, pertraukų metu jie turi būti stabilizuojami. Pasiūlyti būdai (Всероссийский федеральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский технологический институт строительной индустрии «ВНИИЖелезобетон» 1997-12-07; Всероссийский федеральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский технологический институт строительной индустрии «ВНИИЖелезобетон» 1997-06-27) leidžia gauti ekologiškus kompozitinės medžiagos su PPS intarpais gaminius, kurie neturi laisvo stireno. Tai pasiekama naudojant detoksikantus ir cheminius priedus, taip pat taikant PPS intarpų terminį stabilizavimą $60\text{--}87\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje nuo 2,5 iki 5 valandų. Darbe (Всероссийский федеральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский технологический институт строительной индустрии «ВНИИЖелезобетон» 1997-06-27) siūloma PPS granules po pirminio pūtimo pirmiausia dengti APM, o po to – plonu cemento sluoksniu ir termiškai apdoroti $95\text{--}105\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje fiksuoto tūrio formose. Šio proceso metu mišinys plečiasi, oras, esantis tarp PPS granulių, pasišalina, o cementas hidratuojasi. Po $0,5\text{--}1,5$ valandos temperatūra sumažinama iki $60\text{--}75\text{ }^\circ\text{C}$ ir tolesnis terminis abdirbimas vyksta dar $12\text{--}16$ valandų. Visos šios technologijos leidžia gauti specifines savybes turinčius gaminius, tačiau kartu jos yra pakankamai imlios šilumai, brangios.

1.5. Pirmojo skyriaus apibendrinimas ir išvados

XXI a. praktiškai visose technikos srityse naudojamos kompozitinės medžiagos. Jos sudarytos iš kelių skirtingų sudedamųjų dalių, todėl gali užtikrinti reikalavimus, kurių negalėtų užtikrinti tos atskiros sudedamosios dalys. Kompozitinės medžiagos bandinių savybės priklauso nuo jos sudedamųjų dalių savybių, kiekio ir tarpusavio sąveikos.

Ypač dideliu prioritetu kiekvienoje šalyje laikoma pramonės ar buitinių atliekų utilizacija. Nors jų panaudojimas kompozitinių medžiagų gamybai yra vienas iš tinkamiausių minėtų problemų sprendimo būdų, tačiau literatūros analizė rodo, kad darbų, kuriuose būtų spęstas PPS pakavimo taros atliekų

panaudojimas, praktiškai nėra. Minėtų atliekų panaudojimas yra ribotas dėl specifinių jų savybių: mažo tankio ir hidrofobinės prigimties. Dėl jų mišinys, turintis trupintų PPS pakavimo taros atliekų, maišymo metu išsisluoksniuoja, sukietėjęs gaminyje yra nevienalytis, todėl visame jo tūryje vyrauja skirtingos savybės.

Literatūros šaltinių analizė rodo, kad APM dėl savo unikalių savybių taikomos daugelyje pramonės šakų. Plačios jų panaudojimo galimybės, kurios užtikrina technologinių procesų efektyvumo didėjimą ir galutinio produkto kokybės gerėjimą, lėmė didelį APM populiarumą. Ne išimtis ir statybinių medžiagų pramonė, kurioje APM naudojamos jau ne vieną dešimtmetį. Dėl mokslo ir technologijų plėtros rinkai siūloma vis naujų, efektyvesnių APM, todėl prieš pradėdant kurti naują arba tobulinti esamą gaminį, būtina išsiaiškinti ne tik individualias APM savybes, bet ir jų sąveiką su kitomis medžiagomis (įvairiais priedais, priemaisomis, vandeniu, rišamosiomis medžiagomis).

Atlikta mokslinių tyrimų analizė rodo, kad įvairių technologinių veiksmų poveikis kompozitinės medžiagos intarpų hidrofilizacijos procesui, oro tuštumų pasiskirstymui jos matricoje bei kompozitinės medžiagos gaminių kokybiniais rodikliais iki šiol vertintas tik eksperimentiškai, kadangi šie klausimai nėra pakankamai ištirti.

Remiantis pirmojo skyriaus rezultatų apibendrinimu suformuluoti tokie šio darbo uždaviniai:

- ištirti skirtingos rūšies ir koncentracijų vandeninių APM tirpalų savybes ir jų poveikį sukibčiai tarp kompozitinės medžiagos matricos ir intarpų;
- ištirti skirtingos rūšies ir koncentracijų APM priedų ir technologinių veiksmų poveikį kompozitinės medžiagos matricos porizacijai. Remiantis tyrimų rezultatais parinkti patį efektyviausią APM priedą ir jo koncentraciją bei maišymo įrenginį ir optimalią maišymo trukmę jame;
- parinkti 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos formavimo mišinių sudėtis ir maišymo parametrus;
- nustatyti skirtingo tankio kompozitinės medžiagos savybes: tankį, makro- ir mikrostruktūrą, gniuždomąjį ir lenkiamąjį stiprį, sutelktosios apkrovos poveikį, spūdumą, šilumos laidumo koeficientą, kapiliarinės įgerties koeficientą, laidumo vandens garams koeficientą, higroskopinę sorbciją, džiūstamąjį susitraukimą, atsparumą šalčiui ir degumą;
- sukurti kompozitinės medžiagos iš poringosios cemento teslos ir trupintų PPS pakavimo taros atliekų gamybos technologinę schemą.

Naudotų medžiagų aprašymas ir tyrimų metodikos

2.1. Naudotos medžiagos

Darbe naudotos šios APM:

- „Ufapore CC 85“ (Norvegija);
- „Ufapore TP 707“ (Norvegija);
- „Ufapore CC“ (Norvegija);
- „Ufapore TCO“ (Norvegija);
- „PB-2000“ (Rusija);
- sulfonolas su kaulų klėjais (Rusija).

Darbe naudotų APM pagrindinės savybės pateiktos 2.1 lentelėje. Sulfonolo su kaulų klėjais APM sudedamųjų dalių santykis buvo 5:1.

Kaip rišamoji medžiaga buvo naudotas AB „Akmenės cementas“ CEM I 42,5 R markės portlandcementis. Jis atitinka LST EN 197-1/A3 „*Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai*“ reikalavimus. Portlandcemenčio rišimosi pradžia 140 min, pabaiga – 190 min, nustatytos pagal LST EN 196-3 „*Cemento bandymų metodai. 3 dalis. Rišimosi*

trukmių ir tūrio pastovumo nustatymas“ reikalavimus. Specifinis savitasis paviršius pagal Bleiną – 420 kg/m^2 . Cheminė portlandcemenčio sudėtis, nustatyta pagal LST EN 196-2 „*Cemento bandymų metodai. 2 dalis. Cemento cheminė analizė*“ reikalavimus ir pateikta 2.2 lentelėje. Mineralinė portlandcemenčio sudėtis nustatyta pagal Bogue (1955) metodiką ir pateikta 2.3 lentelėje.

2.1 lentelė. Pagrindinės APM savybės

Table 2.1. Main properties of surfactants

APM pavadinimas	Savybės				
	Cheminis apibūdinimas	pH	Molekulinė masė, g/mol	Pavidalas	Aktyvios medžiagos kiekis, %
„Ufapore CC 85“	Anijoninė APM	7,8	-	Baltos spalvos milteliai	85,3
„Ufapore TP 707“	Anijoninė APM	10,7	382	Blyškiai gelsvos spalvos skystis	27,2
„Ufapore CC“	Anijoninės ir nejoninės APM mišinys	8,8	-	Skaidrus skystis	30,1
„Ufapore TCO“	Anijoninė APM	8,0	-	Baltos spalvos milteliai	94,0
„PB–2000“	Anijoninė APM	8,5	-	Rudos spalvos skystis	-
Sulfonolas su kaulų klijais	Anijoninė APM	8,0	290	Gelsvos spalvos milteliai	75,0

2.2 lentelė. Cheminė portlandcemenčio sudėtis

Table 2.2. Chemical composition of Portland cement

Cheminė portlandcemenčio sudėtis, %						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O+Na ₂ O	SO ₃	Kaitmenys
20,76	6,12	3,37	63,50	1,03	0,80	0,30

2.3 lentelė. Mineralinė portlandcemenčio sudėtis**Table 2.3.** Mineral composition of Portland cement

Mineralinė portlandcemenčio sudėtis, %			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
58,54	15,29	10,40	10,17

Kompozitinės medžiagos bandiniams formuoti kaip tarpai naudotos UAB „Virginijus ir Co“ trupintos PPS pakavimo taros atliekos. Jų piltnis tankis 13–17 kg/m³ nustatytas pagal LST EN 1097-6+AC „Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 6 dalis. Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas“ reikalavimus. Tarpų granulimetrinė sudėtis nustatyta naudojant sietus, atitinkančius ISO 3310-1 „Laboratoriniai sietai. Techniniai reikalavimai ir bandymai. 1 dalis. Laboratoriniai pinto metalinio vielinio tinklo sietai“ reikalavimus, pagal LST EN 993-1 „Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas“ reikalavimus ir pateikta 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Trupintų PPS pakavimo taros atliekų granulimetrinė sudėtis**Table 2.4.** Particle size distribution of crushed waste EPS packages

Sieto akučių dydis, mm	20,00	10,00	5,00	2,50	1,25	<1,25
Dalinė liekana, %	0,37	20,02	29,79	22,99	25,48	1,35
Suminė liekana, %	0,37	20,39	50,18	73,17	98,65	100,00
Išbira, %	99,63	79,61	49,82	26,83	97,30	0,00

2.2. Tirpalų ir formavimo mišinių paruošimas bei bandinių formavimas

APM savybėms nustatyti buvo gaminami jų vandeniniai tirpalai iš 20 °C temperatūros distiliuoto vandens ir anksčiau minėtų APM. Vandeniniai APM tirpalai buvo 0,033, 0,099, 0,165, 0,231 ir 0,297 % koncentracijų. Tai atitinka 0,01, 0,03, 0,05, 0,07 ir 0,09 % APM koncentracijas cemento tešloje, kurios V/C = 0,3, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės. Vandeninių APM tirpalų koncentracija perskaičiuota atsižvelgiant į aktyvios medžiagos kiekį APM.

Cemento tešlai, kurios V/C = 0,3, formuoti buvo naudotas minėtos markės portlandcementis, 20 °C temperatūros techninis vanduo ir minėtos šiame darbe APM. Šis V/C pasirinktas atsižvelgiant į cemento tešlos technologiskumą. APM koncentracija, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės, buvo 0,01, 0,03, 0,05, 0,07 ir 0,09 %. APM koncentracija taip pat perskaičiuota atsižvelgiant į

aktyvios medžiagos kiekį APM. Visos cemento tešlos sudedamosios dalys buvo maišomos horizontalia (2.1 pav. a) arba vertikalia (2.1 pav. b) maišyklėmis. Kadangi horizontalios maišyklės talpa yra 15 l, tai vertikalia maišykle taip pat buvo maišoma apvaliame plastikiniame 15 l talpos inde. Abiejų maišyklių greitis visų maišymų metu buvo 125 aps./min.

Paruošta cemento tešla buvo pilama į (20x20x20) mm dydžio formas ir lengvai sutankinama, kad jose tolygiai pasiskirstytų. Kitą dieną suformuoti bandiniai buvo išimti iš formų, uždengti polietileno plėvele ir laikomi 28 paras 20°C temperatūroje. Po to bandiniai buvo kondicionuojami ventiliuojamoje džiovinimo spintoje, esant 105 °C temperatūrai, iki pastovios masės.

Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos formavimo mišinių sudėtys pateiktos 2.5 lentelėje. Formavimo mišinyje naudotas APM priedas „Ufapore TCO“, kurio kiekis, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės, yra 0,03 %. Formavimo metu techninio vandens temperatūra buvo 20 °C.



a



b

2.1 pav. Skirtingos konstrukcijos maišyklės: a – horizontali; b – vertikali

Fig. 2.1. Different type mixers: a – horizontal; b – vertical

2.5 lentelė. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos formavimo mišinių sudėtys

Table 2.5. Compositions of formative mixtures out of composite material with different density

Tankis, kg/m ³	Intarpų dydis, mm	Portlandcementis : intarpai (pagal masę), %	V/C
150	Ne didesnis kaip 5,00	83 : 17	0,80
250	Mažesnis kaip 20,00	91 : 9	0,65
350	Mažesnis kaip 20,00	94 : 6	0,50

Kompozitinės medžiagos sudedamosios dalys buvo maišomos vertikalioje maišyklėje. Jos greitis maišymo metu – 125 aps./min. Kompozitinės medžiagos sudedamųjų dalių maišymo tvarka buvo tokia: vanduo ir APM maišomi 1 min. Po to į šį tirpalą pridedamas reikalingas kiekis portlandcemenčio ir maišoma 2 min. Į gautą cemento tešlą supilamas reikiamas kiekis trupintų PPS pakavimo taros atliekų ir sudedamosios dalys maišomos, kol gaunama vienalytė formavimo masė (5 min.). Po to ji supilama į reikiamo dydžio formas ir lengvai sutankinama 2,0 mm skersmens strypelio dūriais, kad tolygiai pasiskirstytų jose.

Suformuoti 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniai kitą dieną buvo išformuojami, uždengiami polietileno plėvele ir išlaikomi 28 paras 20 °C temperatūroje. Po to jie kondicionuojami ventiliuojamoje džiovinimo spintoje, esant 50 °C temperatūrai, iki pastovios masės.

2.3. Tyrimų metodikos

Vandeninių APM tirpalų tyrimai. Vandeninių APM tirpalų paviršiaus įtempis buvo matuotas Rebinderio aparatu (2.2 pav.). Į gerai išplautą jo mėgintuvėlį įpilama 5 ml distiliuoto vandens ir prie paviršiaus priliečiamas vamzdelio kapiliaras. Iš aspiratoriaus lašant distiliuotam vandeniui, nustatomas maksimalus skysčio aukščių skirtumas manometro atšakose. Po to, nekeičiant distiliuoto vandens lašėjimo iš aspiratoriaus greičio, įpilama 5 ml mažiausios koncentracijos vandeninio APM tirpalo ir vėl išmatuojamas aukščių skirtumas manometro atšakose.

Matavimai atliekami su visais vandeniniais APM tirpalais, kurių koncentracija kito 0,033–0,297 % ribose. Atlikta po 3 matavimus, skaičiavimuose naudotas jų aritmetinis vidurkis. APM vandeninių tirpalų paviršiaus įtempis apskaičiuotas pagal formulę:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_0 \cdot h_x}{h_0}, \text{ N/m}, \quad (2.1)$$

čia σ_0 – distiliuoto vandens paviršiaus įtempis, N/m;

h_0 – distiliuoto vandens aukščių skirtumas manometro atšakose, mm;

h_x – APM vandeninio tirpalo aukščių skirtumas manometro atšakose, mm.



2.2 pav. Vandeninio APM tirpalo paviršiaus įtempio matavimas
Fig. 2.2. Measurement of surface tension of surfactant water solution

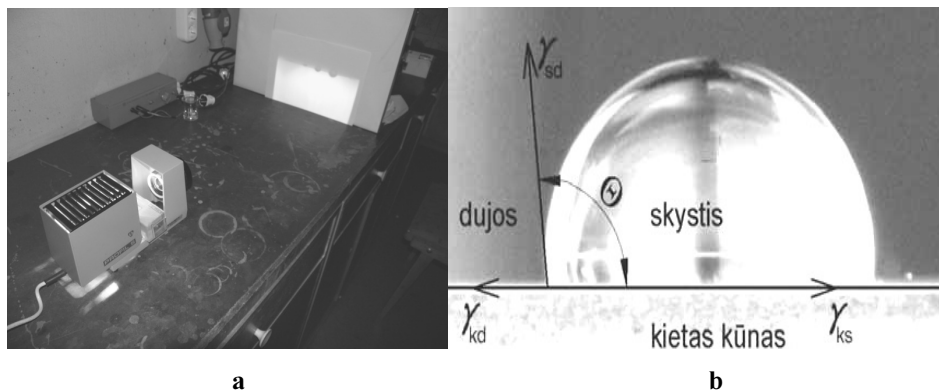
Techniškai yra neįmanoma nustatyti vandeninio APM tirpalo lašo suformuoto vilgymo kampo ant trupintų PPS pakavimo taros atliekų paviršiaus. Skirtingos rūšies ir koncentracijų vandeninių APM tirpalų vilgymo kampai buvo nustatyti ant taip pat hidrofobinio paviršiaus – parafinu dengtos metalinės plokštelės. Lašo padėtis fiksuota „Varimex“ projektoriumi ir skaitmeniniu fotoaparatu „Canon“ (2.3 pav. a). Per trijų fazių susikirtimo tašką išvesta liestinė su kieto kūno paviršiumi ir sudaro minėtą vilgymo kampą (2.3 pav. b), kurio vertė nustatoma matlankiu.

Nustačius vandeninių APM tirpalų paviršiaus įtempio ir vilgymo kampo vertes buvo apskaičiuotas jų vilgymas. Jis apibūdinamas terminu „sukibties darbas“ (W_{Ad}) ir apskaičiuotas pagal formulę:

$$W_{Ad} = \sigma_{lv}(1 + \cos \theta), \text{N/m}, \quad (2.2)$$

čia σ_{lv} – skystos fazės paviršiaus įtempis, N/m;

θ – vilgymo kampas kietos, skystos ir dujinės fazių sąlyčio zonoje, °.



2.3 pav. Vandeninio APM tirpalo vilgymo kampo matavimas:
a – prietaisas; b – lašo sudaromas kampas (Liugienė et al. 2006)
Fig. 2.3. Measurement of contact angle of surfactant water solution:
a – apparatus; b – angle formed by drop (Liugienė et al. 2006)

Cemento tešlos ir cemento akmenys tyrimai. Cemento tešlos tankis nustatytas po kiekvienų 2 maišymo minučių iki 34 maišymo minučių. Tam naudotas apvalus metalinis 0,5 litro talpos indas. Cemento tešlos tankis (ρ_{ct}) nustatytas sveriant tuščią, o po to pripildytą cemento tešlos indą ir apskaičiuotas pagal formulę:

$$\rho_{ct} = \frac{m_F - m_E}{V} \cdot 10^6, \text{ kg/m}^3, \quad (2.3)$$

čia m_F – pripildyto cemento tešlos indo masė, g;
 m_E – tuščio indo masė, g;
 V – indo tūris, mm^3 .

Cemento akmenų bandinių tankis (ρ_{ca}) buvo nustatytas po 4, 8, 14, 24 ir 34 maišymo minučių, maišant vertikalioje arba horizontalioje maišyklėje, ir apskaičiuotas pagal formulę:

$$\rho_{ca} = \frac{m_{dry}}{V} \cdot 10^6, \text{ kg/m}^3, \quad (2.4)$$

čia m_{dry} – išdžiovinto cementinio akmenų bandinio masė, g;
 V – cementinio akmenų bandinio tūris, mm^3 .

Cemento akmens bandiniuose esančių porų skersmuo ir tūris nustatyti gyvsidabrinio porų matuokliu „Poremaster 33“ (2.4 pav.). Tirti bandiniai, kurie buvo suformuoti cemento tešlą maišant vertikalioje maišyklėje 8 minutes ir joje panaudojus 0,03 % koncentracijos, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės, visų rūšių APM.



2.4 pav. Gyvsidabrinis porų matuoklis „PoreMaster 33“

Fig. 2.4. Mercurial pore measurer “PoreMaster 33”

Kompozitinės medžiagos bandinių savybių nustatymas. Kadangi nėra standartų kuriamos kompozitinės medžiagos bandinių savybėms nustatyti, jos mažas tankis lėmė, kad tyrimai buvo atlikti pagal termoizoliacinėms medžiagoms ir autoklaviniam akylajam betonui taikomas tyrimų metodikas.

Kompozitinės medžiagos bandinių tankis (ρ_a) buvo nustatytas pagal LST EN 1602+AC+P „*Statybinės termoizoliacinės medžiagos. Tankio nustatymas*“. Bandyta po 5 (100x100x100) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius.

Kompozitinės medžiagos bandinių makrostruktūros tyrimai atlikti optiniu mikroskopu „Motic“ (didinimas iki 100 kartų), charakteringos zonos fotografuotos skaitmenine kamera „Pixera PVC 100C“, kuri sujungta su kompiuteriu.

Kompozitinės medžiagos bandinių mikrostruktūros tyrimams atlikti buvo fotografuojami būdingi lūžio tarp matricos ir tarpų paviršiai. Šie paviršiai buvo atrinkti po tyrimo optiniu mikroskopu. Prieš tyrimą bandinių paviršiai buvo apgarinti vakuume auksu. Tyrimai atlikti firmos „LEO“ skenuojančiu elektroniniu mikroskopu „EVO 50“.

Junginiai, susidarę kietėjant kompozitinės medžiagos matricai, nustatyti rentgenografiškai ištyrus mechaniškai susmulkintas iki 10 μm dydžio jos

daleles. Šie tyrimai atlikti naudojant difraktometrą „DRON-2“ (antikatodas – Co, filtras – Fe, darbo režimas $U = 30 \text{ kV}$, $I = 10 \text{ mA}$).

Kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomasis ir lenkiamasis stipriai, sutelktosios apkrovos poveikis ir spūdumas nustatyti kompiuterizuota įranga „Haunsfield-H10KS“ naudojant programą „Qmat Professional“.

Faktinio tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomasis ir lenkiamasis stipriai buvo perskaičiuoti, pasirinkus reikiamą tankį, pagal formulę:

$$\sigma_{pr} = \frac{\sigma_f \cdot \rho_{pr}^2}{\rho_f^2}, \text{ N/mm}^2, \text{ (MPa)}, \quad (2.5)$$

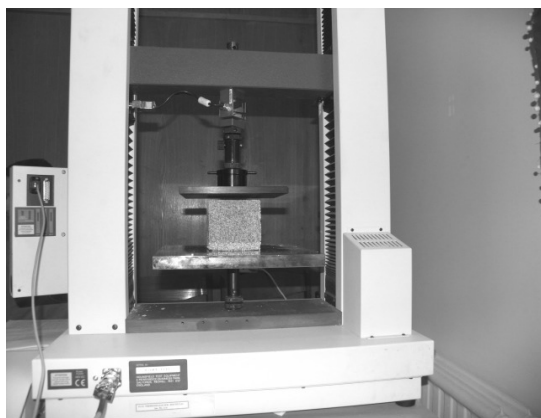
čia σ_{pr} – pasirinkto tankio kompozitinės medžiagos bandinio stipris, N/mm^2 , (MPa);

σ_f – faktinio tankio kompozitinės medžiagos bandinio stipris, N/mm^2 , (MPa);

ρ_{pr} – pasirinktas bandinio tankis, kg/m^3 ;

ρ_f – faktinis bandinio tankis, kg/m^3

Kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomasis stipris (σ_{kr}) nustatytas pagal LST EN 826 „*Statybinės termoizoliacinės medžiagos. Stiprio gniuždant nustatymas*“. Bandyta po 5 (100x100x100) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius (2.5 pav.). Įrenginio pastūmos mechanizmo greitis bandymo metu – 10 mm/min.



2.5 pav. Įranga eksperimentams atlikti pagal standartų reikalavimus

Fig. 2.5. Equipment for tests execution in accordance with requirements of standards

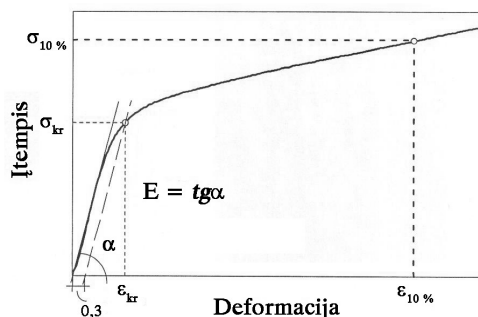
Pagal šio standarto reikalavimus, jei didžiausia įtempio vertė pasiekama, kai santykinė bandinio deformacija yra mažesnė kaip 10 %, tai apkrova yra priimama kaip gniuždomasis stipris ir nurodoma ją atitinkanti gniuždomoji deformacija. Jei bandinys nesuyra iki 10 % santykinės bandinio deformacijos, tai gniuždomasis stipris apskaičiuojamas esant 10 % santykinei deformacijai.

Tačiau naujausios literatūros (Vaitkus 2007) analizė rodo, kad skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomasis stipris turi būti vertinamas atsižvelgiant į deformacijų vystymosi ir struktūros suirimo specifiką, išryškėjančią kreivėje „įtempis-deformacija“. Analizuojant šias kreives, nustatomos ribinės santykinės deformacijos gniuždant ϵ_{kr} , iki kurių pasiekimo yra išlaikoma kvazilinijinė priklausomybė $\sigma = f(\epsilon)$ ir kurias viršijus stebimas ženklus deformacijų augimas bei nukrypimas nuo linijinės priklausomybės.

Kritinių įtempių σ_{kr} vertės buvo nustatytos iš bandymo metu nubrėžtų kreivių „įtempis-deformacija“. Tam tikslui per koordinatų pradžią buvo išvedama deformacijų kreivės liestinė ir lygiagreti jai linija per tašką $\epsilon = 0,3 \%$ (2.6 pav.). Šios linijos susikirtimo su deformacijų kreive taško abscisė atitinka santykinę deformaciją ϵ_{kr} , o ordinatė – įtempį σ_{kr} , atitinkantį staigų pradinio kompozitinės medžiagos bandinio stiprio sumažėjimą. Gniuždomasis stipris (σ_{kr}) apskaičiuotas pagal formulę:

$$\sigma_{kr} = \frac{F_{kr}}{A_0}, \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}, \quad (2.6)$$

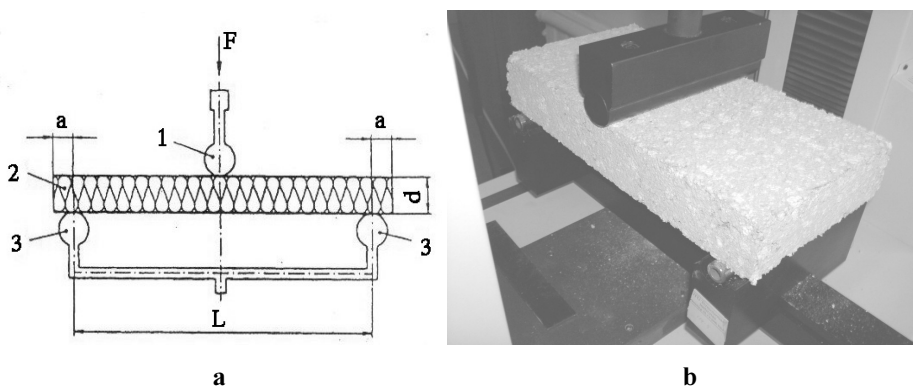
čia F_{kr} – bandinio apkrova, atitinkanti ribinę santykinę deformaciją, N;
 A_0 – pradinis bandinio skerspjūvio plotas, mm^2 .



2.6 pav. Kompozitinės medžiagos bandinio gniuždymo kreivė „įtempis-deformacija“

Fig. 2.6. Compressive curve “stress-strain” of composite material sample

Kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamasis stipris (σ_x) nustatytas pagal LST EN 12089 „Statybinės termoizoliacinės medžiagos. Stiprio lenkiant nustatymas“ (2.7 pav.). Bandyta po 3 (300x150x50) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius. Įrenginio pastūmos mechanizmo greitis bandymo metu – 10 mm/min.



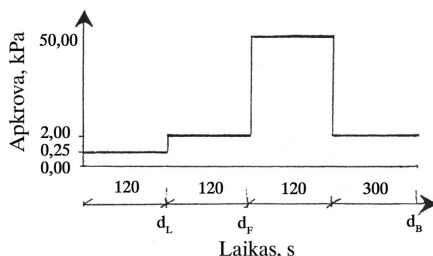
2.7 pav. Principinė bandymo įrenginio schema (a) ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinys eksperimento metu (b):

1 – lenkiantysis antgalis; 2 – bandinys; 3 – atramos

Fig. 2.7. Principle scheme of test equipment (a) and composite material sample with density of 350 kg/m³ during experiment (b):

1 – bending tip; 2 – sample; 3 – supports

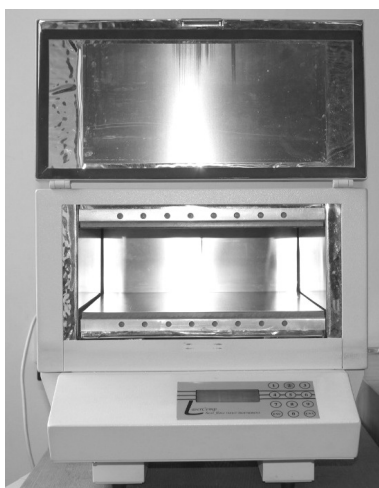
Kompozitinės medžiagos bandinių spūdumas (c) buvo nustatomas pagal LST EN 12431 „Statybiniai termoizoliaciniai gaminiai. Judriųjų grindų izoliacinių gaminių storio nustatymas“. Bandyta po 10 kiekvieno tankio (200x200x50) mm dydžio kompozitinės medžiagos bandinių. Reikalavimai apkrovos dydžiui ir jos išlaikymo trukmei pateikti 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Standarto LST EN 12431 reikalavimai apkrovos dydžiui ir išlaikymo trukmei

Fig. 2.8. Requirements of the standard LST EN 12431 for load value and exposure time

Kompozitinės medžiagos bandinių šilumos laidumo koeficientas (λ_{10}), esant vidutinei 10 °C temperatūrai, nustatytas naudojant „FOX-304“ kompiuterizuotą įrenginį (2.9 pav.) pagal LST EN 12664+AC+P „Šiluminės statybinių medžiagų ir gaminių charakteristikos. Šiluminės varžos nustatymas apsaugotos karštosios plokštės ir šilumos srauto matuoklio metodais. Vidutinės ir mažos šiluminės varžos sausi ir drėgni gaminiai“. Bandyta po 3 (300x300x50) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius.

**a****b**

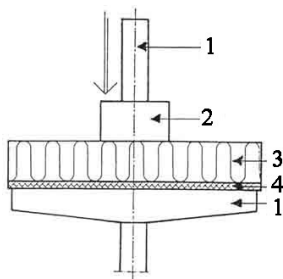
2.9 pav. Kompiuterizuota įranga kompozitinės medžiagos bandinių šilumos laidumo koeficientui nustatyti:

a – matavimo kamera; b – aušintuvas

Fig. 2.9. Computerized equipment for determination of thermal conductivity coefficient of composite material samples:

a – measure chamber; b – cooler

Kompozitinės medžiagos bandinių sutelktosios apkrovos (F_p) vertė buvo nustatoma pagal LST EN 12430 „Statybiniai termoizoliaciniai gaminiai. Sutelktosios apkrovos įtakos nustatymas“ (2.10 pav.). Bandyta po 3 (300x300x50) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius. Sutelktosios apkrovos (F_p) vertė nustatoma iš gniuždomosios jėgos–deformacijos kreivės kritiniame taške arba esant tam tikrai deformacijai. Įrenginio pastūmos mechanizmo greitis bandymo metu – 50 mm/min.



2.10 pav. Standarto LST EN 12430 reikalavimai bandymo įrangai

1 – jungtis su bandymo įrenginiu; 2 – spaudas; 3 – bandinys; 4 – atraminė plokštė

Fig. 2.10. Requirements of the standard LST EN 12430 for test equipment

1 – connection to testing machine; 2 – indenter; 3 – test sample; 4 – supporting plate

Kapiliarinės įgerties koeficientas ($c_{w,s}$) nustatytas pagal LST EN 772-11+A1 „Mūro gaminių bandymo metodai. 11 dalis. Užpildų betono, autoklavinio akytojo betono, dirbtinio bei gamtinio akmens mūro gaminių kapiliarinės vandens įgerties ir keraminių mūro gaminių pradinės vandens įgerties spartos nustatymas“. Bandyta po 6 (100x100x100) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius.

Kompozitinės medžiagos bandinių laidumo vandens garams savybės nustatytos reguliuojamo temperatūrinio režimo kameroje (2.11 pav.) pagal LST EN 12086 „Statybinės termoizoliacinės medžiagos. Laidumo vandens garams nustatymas“. Induose naudotas ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) druskos vandeninis tirpalas, užtikrinantis 52 % santykinį drėgnį, o kameroje – (KNO_3), užtikrinantis 94,0 % santykinį drėgnį. Bandyta po 5 (150x150x50) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius.



2.11 pav. 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniai eksperimento metu

Fig. 2.11. Composite material samples with density of 250 kg/m³ during experiment

Kompozitinės medžiagos bandinių masės pokytis dėl higroskopinės adsorbcijos buvo nustatytas reguliuojamo temperatūrinio-drėgminio režimo patalpoje pagal LST EN ISO 12571 „*Statybinių medžiagų ir gaminių higroterminės charakteristikos. Higroskopinės sorbcijos savybių nustatymas*“. Paruošti 4 eksikatoriai su sočiaisiais druskų (K_2CO_3), (NaBr), $((NH_4)_2SO_4)$ ir (KNO_3) tirpalais, užtikrinančiais juose 43,2, 58,2, 81,1 ir 94,0 % santykinį drėgnį, esant 23,0 °C aplinkos temperatūrai. Eksperimento metu naudotos svarstyklės „Kern“, kurių tikslumas 0,001 g. Bandyta po 3 (100x100x20) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius.

Kompozitinės medžiagos bandinių santykinis ilgio pokytis džiūstant (ϵ_{csi}) buvo nustatytas reguliuojamo temperatūrinio-drėgminio režimo kameroje pagal LST EN 680 „*Autoklavinio akybetonio susitraukimo džiūstant nustatymas*“. Bandinio ilgio pokytis matuotas skaitmeniniu indikatoriumi „Mitutoyo ID-C112B“, kurio tikslumas 0,001 mm, naudojant kompiuterinę programą „DMX Viewer“ (2.12 pav.). Bandyta po 3 (40x40x160) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius.



2.12 pav. 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinys eksperimento metu

Fig. 2.12. Composite material sample with density of 350 kg/m³ during experiment

Kompozitinės medžiagos bandinių atsparumas šalčiui nustatytas naudojant tūrinio šaldymo–atšildymo būdą pagal LST EN 15304 „*Autoklavinio akytojo betono atsparumo šalčiui nustatymas*“. Bandyta po 36 (100x100x100) mm dydžio kiekvieno tankio kompozitinės medžiagos bandinius (2.13 pav.).

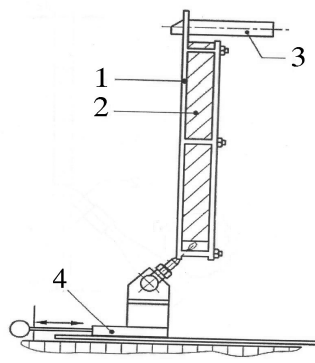


2.13 pav. 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniai eksperimento metu
Fig. 2.13. Composite material samples with density of 250 kg/m³ during experiment

Kompozitinės medžiagos bandiniai buvo tirti pagal 3 skirtingai sumodeliuotus gaisro kilimo ir plėtojimosi scenarijus. Pirmasis imituoja gaisro pradžią, kai bandinio ribotą plotą veikia mažo šilumos našumo liepsna (prilygsta degtuko liepsnos šilumos našumui). Bandymas atliktas pagal LST EN ISO 11925-2 „*Degumo bandymai. Statybos gaminių užsidegamumas nuo tiesioginio liepsnos poveikio. 2 dalis. Bandymas pavieniu liepsnos šaltiniu*“ (2.14 pav.).



a



b

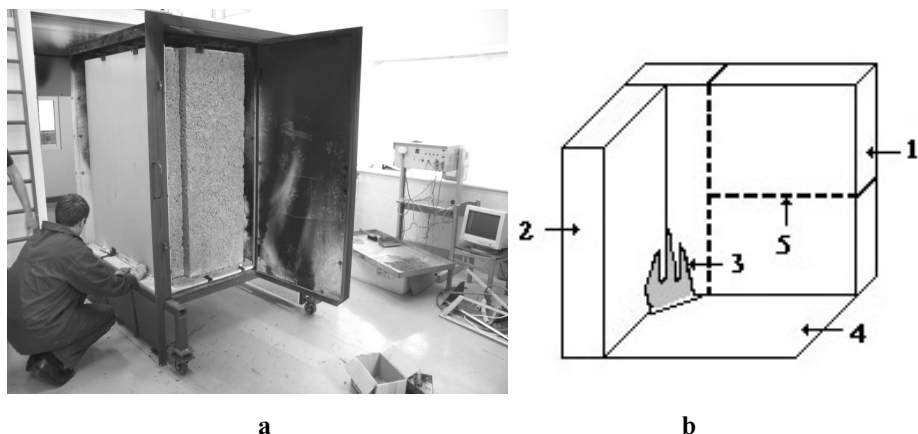
2.14 pav. Bandymo įranga pagal standarto LST EN ISO 11925-2 reikalavimus:

1 – bandinio laikiklis; 2 – bandinys; 3 – atrama; 4 – degiklio pagrindas

Fig. 2.14. Test equipment in accordance with requirements of LST EN ISO 11925-2 standard: 1 – sample holder; 2 – sample; 3 – support; 4 – base of burner

Šis metodas skirtas B, C, D ir E degumo klasių statybos gaminiams bandyti. Bandyta po 6 (250x90x60) mm dydžio skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinius.

Antrasis scenarijus modeliuoja besiplėtojančią gaisrą, kai kambario kampe dega objektas, kurio liepsnos šilumos našumas prilygsta šiukšliadėžėje degančio popieriaus šilumos našumui. Šis bandymas tinka A2, B, C ir D degumo klasėms nustatyti. Jis atliktas pagal LST EN 13823 „Statybos gaminių degumo bandymai. Statybos gaminiai, išskyrus grindų klojinius, termiškai veikiami vienu degančiu objektu“ (2.15 pav.).



2.15 pav. Bandymo įranga (a) ir bandinių montavimo schema (b) pagal standarto LST EN 13823 reikalavimus:

1 – ilgasis sparnas; 2 – trumpasis sparnas; 3 – degiklis; 4 – vežimėlis; 5 – sujungimai

Fig. 2.15. Test equipment (a) and scheme of samples mounting (b) in accordance with requirements of LST EN 13823 standard:

1 – long wing; 2 – short wing; 3 – burner; 4 – wagon; 5 – fixings

Bandyta po 3 skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių ilgųjų ir trumpųjų sparnų rinkinius, kurių trumpojo sparno dydis (500x1500x200) mm, o ilgojo sparno – (1000x1500x200) mm.

Trečiasis scenarijus prilygsta visiškai išsiplėtojusiam gaisrui, šiuo atveju bandinys iš visų pusių buvo veikiamas didelio šilumos našumo šaltinio. Šis bandymas taikomas A1 ir A2 degumo klasėms nustatyti. Bandymas atliktas pagal LST EN ISO 1182 „Statybos gaminių degumo bandymai. Nedegumo bandymas“ (2.16 pav.).



2.16 pav. Bandymo įranga pagal standarto LST EN ISO 1182 reikalavimus
Fig. 2.16. Test equipment in accordance with LST EN ISO 1182 standard requirements

Bandyta po 5 cilindro formos skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinius, kurių tūris – $(76 \pm 8) \text{ cm}^3$, skersmuo – $(45 \pm 2) \text{ mm}$, o aukštis – $(50 \pm 3) \text{ mm}$.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Darbe formavimo mišiniai ruošti ir bandiniai formuoti daugiausiai naudojant vietines medžiagas (tame tarpe ir paruoštas iš Lietuvoje esančių atliekų).
2. Kadangi nėra standartų kuriamos kompozitinės medžiagos bandinių savybėms nustatyti, jos mažas tankis lėmė, kad tyrimai buvo atlikti pagal termoizoliacinėms medžiagoms ir autoklaviniam akytajam betonui taikomas tyrimų metodikas.

Vandeninių APM tirpalų tyrimai

3.1. Paviršiaus įtempis

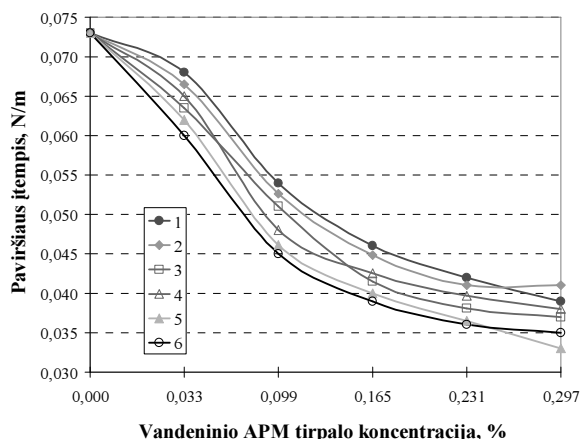
Daugelyje statybos pramonės sričių kaip tirpiklis yra naudojamas vanduo. Ne išimtis yra ir kuriama nauja kompozitinė medžiaga, kurios visos sudedamosios dalys maišomos vandens terpėje.

Vanduo sudaro trimates struktūras, kuriose molekulės sujungtos vandenilniais ryšiais, kurie nuolat nutrūksta ir vėl susidaro. Ištirpusios APM angliavandenilio grandinės suardo ryšius tarp artimiausių vandens molekulių ir gali pakeisti vandens struktūrą. Dažniausiai tirpalas priešinasi vandens struktūros pokyčiui ir todėl APM molekulės priverstos užimti tokią padėtį, kurioje jų grandinės šalinasi iš tirpalo struktūros. Akivaizdus šio reiškinio požymis yra APM molekulių koncentracija tarpfazinėje riboje tarp vandeninio tirpalo ir oro. Tokia APM adsorbcija paviršiuose keičia šių paviršių savybes, ypač tarpfazinės ribos (skysčio) įtempį, kuris labai sumažėja (Musnickas 2001).

Mažas skystos fazės paviršiaus įtempis padeda įtraukti orą į cemento teslą jos maišymo metu. Daugelyje sistemų kietasis kūnas-skystis vilgymas taip pat pagerinamas sumažinus skystos fazės paviršiaus įtempį.

Atliktų tyrimų duomenų analizė rodo, kad skirtingos rūšies ir koncentracijos APM vandeninių tirpalų paviršiaus įtempio (σ_x) vertės kinta

0,068–0,033 N/m ribose (3.1 pav.). Visų rūšių APM ir visos jų koncentracijos sumažino distiliuoto vandens paviršiaus įtempį, kurio pradinė vertė buvo 0,073 N/m. Mažiausios paviršiaus įtempio vertės, kintančios 0,060–0,035 N/m ir 0,062–0,033 N/m ribose, nustatytos tiriant APM „Ufapore TCO“ ir „Ufapore CC“ vandenius tirpalus, jų koncentracijai kintant 0,033–0,297 % ribose. Didžiausios vandeninių APM tirpalų paviršiaus įtempio vertės nustatytos tiriant APM sulfonolą su kaulų klijais 0,068–0,039 N/m ir „Ufapore CC 85“ 0,067–0,041 N/m, jų koncentracijai kintant 0,033–0,297 % ribose.



3.1 pav. APM rūšies ir koncentracijos poveikis vidutinei vandeninio tirpalo paviršiaus įtempio vertei:

1 – sulfonolas su kaulų klijais; 2 – „Ufapore CC 85“; 3 – „PB-2000“;
4 – „Ufapore TP 707“; 5 – „Ufapore CC“; 6 – „Ufapore TCO“

Fig. 3.1. Influence of surfactant type and concentration on average value of surface tension of water solution:

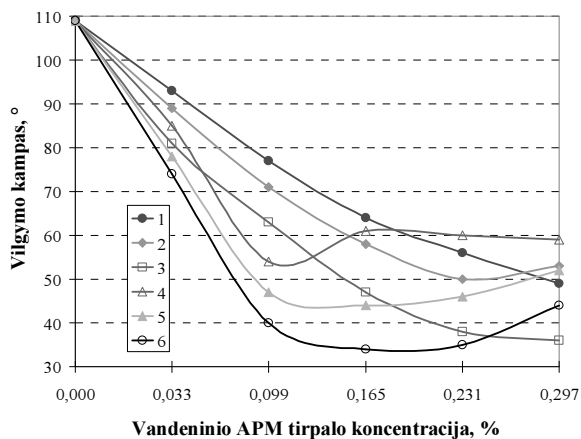
1 – sulfonol with bone glue; 2 – “Ufapore CC 85”; 3 – “PB-2000”;
4 – “Ufapore TP 707”; 5 – “Ufapore CC”; 6 – “Ufapore TCO”

3.2. Vilgymo kampas

Kietojo kūno vilgymo kiekybinis matas yra $\cos \theta$, kur θ – ribinis kampas, kurį sudaro liestinė, išvesta per trijų fazių susikirtimo tašką, su kietojo kūno paviršiumi (1.7 pav.). Užlašinus skysčio ant kieto paviršiaus, galimi trys atvejai: 1) lašas pasklinda; 2) lašas lieka ant paviršiaus rutuliuko formos; 3) lašas iš dalies pasklinda, sudarydamas tam tikrą vilgymo kampą. Jeigu skysčio lašas pasklinda kietojo kūno paviršiuje arba sudaro su juo smailą ribinį kampą,

sakoma, kad skystis vilgo minėtą paviršių. Paviršiai, ant kurių skysčio lašas nepasklinda arba su juo sudaro buką kampą, yra nevilgomi minėto skysčio. Skystis tuo geriau vilgys kietojo kūno paviršių (maža θ vertė), kuo mažesnis bus skysčio paviršiaus įtempis, kuo didesnė bus kietojo kūno paviršiaus energija ir kuo mažesnis bus įtempis kietojo kūno ir skysčio sąlyčio zonoje (Asthana *et al.* 2006).

Atliktų tyrimų duomenų analizė rodo, kad distiliuoto vandens lašas ant parafinu dengtos metalinės plokštelės paviršiaus sudaro 109° vilgymo kampą (3.2 pav.). Keičiant APM rūšį ir koncentraciją galima sumažinti distiliuoto vandens lašo ant minėto kietojo kūno paviršiaus vilgymo kampo vertę $16\text{--}77^\circ$ ribose. Mažiausios vilgymo kampo vertės nustatytos naudojant APM „Ufapore TCO“. Jos koncentracijai kintant $0,033\text{--}0,231\%$ ribose, vilgymo kampo vertė kito $74\text{--}35^\circ$ ribose. Didesnės vilgymo kampo vertės gautos naudojant APM „Ufapore CC“, ir „PB-2000“. Jų koncentracijai kintant $0,033\text{--}0,165\%$ ir $0,231\text{--}0,297\%$ ribose, minėtų APM vandeninių tirpalų vilgymo kampo verčių pokytis buvo atitinkamai $78\text{--}44^\circ$ ir $38\text{--}36^\circ$. Didžiausios vandeninių tirpalų vilgymo kampo vertės gautos naudojant APM sulfonolą su kaulų klijais ir „Ufapore TP 707“. Jų koncentracijai kintant $0,033\text{--}0,165\%$ ir $0,231\text{--}0,297\%$ ribose, vilgymo kampo vertės kito atitinkamai $93\text{--}64^\circ$ ir $60\text{--}59^\circ$ ribose.



3.2 pav. APM rūšies ir koncentracijos poveikis

vidutinei vandeninio tirpalo vilgymo kampo vertei:

1 – sulfonolas su kaulų klijais; 2 – „Ufapore CC 85“; 3 – „PB-2000“;

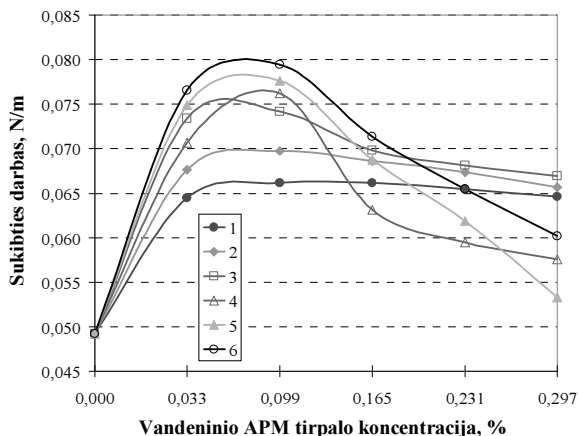
4 – „Ufapore TP 707“; 5 – „Ufapore CC“; 6 – „Ufapore TCO“

Fig. 3.2. Influence of surfactant type and concentration on average value of contact angle of water solution:

- 1 – sulfonol with bone glue; 2 – “Ufapore CC 85”; 3 – “PB-2000”;
4 – “Ufapore TP 707”; 5 – “Ufapore CC”; 6 – “Ufapore TCO”

3.3. Sukibties darbas

Atlikus tyrimus ir nustačius skirtingos rūšies ir koncentracijos APM vandeninių tirpalų paviršiaus įtempio ir vilgymo kampo vertes, pagal 2.2 formulę galima apskaičiuoti jų sukibties darbą. Kuo didesnė yra sukibties darbo vertė, tuo geresnis bus kieto kūno vilgymas skysčiu ir atvirkščiai, esant mažai sukibties darbo vertei, bus blogas kietojo kūno vilgymas skysčiu. Atlikti skaičiavimai rodo, kad gryno distiliuoto vandens sukibties darbo vertė yra 0,049 N/m (3.3 pav.).



3.3 pav. APM rūšies ir koncentracijos poveikis vidutinei vandeninio tirpalo sukibties darbo vertei:

- 1 – sulfonolas su kaulų klijais; 2 – „Ufapore CC 85“; 3 – „PB-2000“;
4 – „Ufapore TP 707“; 5 – „Ufapore CC“; 6 – „Ufapore TCO“

Fig. 3.3. Influence of surfactant type and concentration on average value of work of adhesion of water solution:

- 1 – sulfonol with bone glue; 2 – “Ufapore CC 85”; 3 – “PB-2000”;
4 – “Ufapore TP 707”; 5 – “Ufapore CC”; 6 – “Ufapore TCO”

Didžiausios sukibties darbo vertės gautos naudojant visų rūšių APM, kai jų koncentracija yra 0,099 %. Šios vertės kinta 0,079–0,066 N/m ribose. Toliau didinant APM koncentraciją, sukibties darbo vertės mažėja, tačiau vis tiek yra didesnės, palyginti su gryno distiliuoto vandens skaičiavimo rezultatais.

Didžiausia sukibties darbo vertė, APM koncentracijai kintant 0,033–0,165 % ribose, gauta naudojant „Ufapore TCO“, ji kito 0,077–0,071 N/m ribose. APM koncentracijai kintant 0,231–0,297 % ribose, didžiausia sukibties darbo vertė gauta naudojant „PB-2000“ ir kito 0,068–0,067 N/m ribose. Esant 0,033–0,099 %, 0,165–0,231 % ir 0,297 % APM koncentracijoms, mažiausios vandeninių tirpalų sukibties darbo vertės gautos naudojant sulfonolą su kaulų klėjais, „Ufapore TP 707“ ir „Ufapore CC“. Jų vertės buvo atitinkamai 0,064–0,066 N/m, 0,063–0,060 N/m ir 0,053 N/m.

Atlikus vandeninių APM tirpalų sukibties darbo verčių analizę daroma teorinė prielaida, kad maišymo metu visos tirtos APM pagerins trupintų PPS pakavimo taros atliekų dengimą jų vandeniniais tirpalais, palyginti su gryno distiliuoto vandens tyrimų rezultatais. Tuomet bus užtikrintas ir geras minėtų atliekų dengimas cemento tešla. Tai ypač svarbu kuriant naują kompozitinę medžiagą su hidrofobiniais intarpais.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad visos tirtos APM, esant visoms jų koncentracijoms, mažina vandeninio APM tirpalo paviršiaus įtempio ir lašo, sudaryto ant parafinu dengtos metalinės plokštelės paviršiaus, vilgymo kampo vertes.
2. Atlikų tyrimų duomenų analizė parodė, kad mažiausios vandeninių APM tirpalų paviršiaus įtempio ir lašo, sudaryto ant parafinu dengtos metalinės plokštelės, vilgymo kampo vertės gautos naudojant APM „Ufapore TCO“. Jos koncentracijai kintant 0,033–0,231 % ribose, paviršiaus įtempio vertė sumažėjo 21,7–102,8 %, o vilgymo kampo – 47,3–211,4 %, palyginti su distiliuoto vandens tyrimo rezultatais.
3. Skaičiavimo rezultatų analizė rodo, kad didžiausios vandeninių APM tirpalų sukibties darbo vertės gautos esant jų koncentracijai 0,099 %.
4. Atliktų tyrimų duomenų analizė parodė, kad efektyviausia APM, užtikrinanti trupintų PPS pakavimo taros atliekų gerą vilgymą pagal (Jenuševičienė 1967) reikalavimus, yra „Ufapore TCO“. Jos vandeninio tirpalo optimali koncentracija – 0,099 %. Esant šiai koncentracijai, gauta 61,2 % didesnė sukibties darbo vertė, palyginti su gryno distiliuoto vandens skaičiavimo rezultatais.

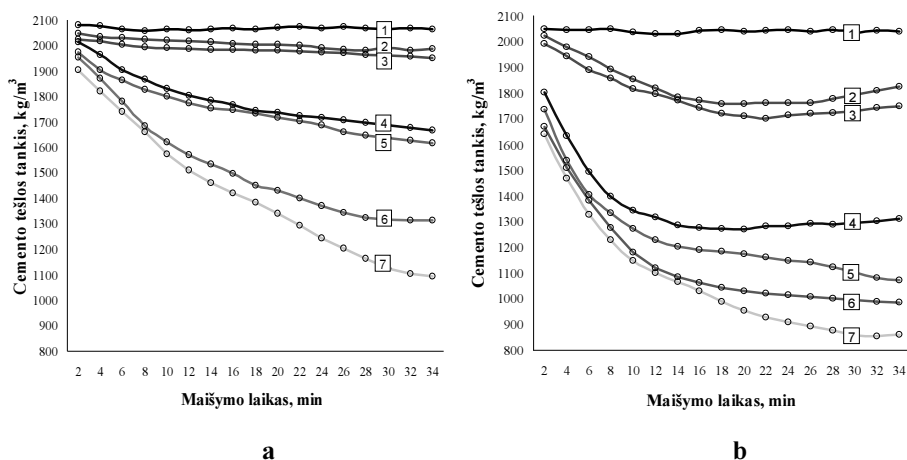
Cemento tešlos ir cemento akmens tyrimai

4.1. Cemento tešlos tyrimai

Kuriamos kompozitinės medžiagos savybės (taip pat ir tankis), naudojant ypač lengvus intarpus, tokius kaip trupintos PPS pakavimo taros atliekos, daugiausia priklauso nuo matricos tankio ir jos kiekio kompozitinės medžiagos tūryje. Norint gauti $150\text{--}350\text{ kg/m}^3$ tankio kompozitinę medžiagą, būtina ne tik užtikrinti gerą intarpų iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų dengimą cementine matrica (panaikinti jų hidrofobinę prigimtį), bet ir suformuoti oro tuštumas joje. Skirtingų rūšių ir koncentracijų APM poveikis kietojo kūno vilgymui skysčiu plačiau nagrinėtas 3 skyriuje. Maišant cemento tešlą, kurioje panaudota APM, mažinamas skystos fazės paviršiaus įtempis ir mechaniniu darbu (maišymu) suformuojamos tam tikro skersmens oro tuštumos joje. Oro tuštumų formavimas yra nenutrūkstamas procesas, nes cemento tešlos maišymo metu formuojamos naujos, o tuo pat metu gali būti suardomos anksčiau joje suformuotos oro tuštumos. Minėtas procesas priklauso nuo daugelio APM individualių savybių, cemento tešlos reologijos ir maišyklės konstrukcijos.

Šiame skyriuje tirtas skirtingų technologinių veiksnių, tokių kaip APM rūšis, jos koncentracija, maišyklės konstrukcija ir maišymo trukmė joje, poveikis cemento tešlos tankio pokyčiui.

APM rūšies, maišyklės konstrukcijos ir maišymo joje trukmės poveikis cemento tešlos tankiui. 3 skyriuje nustatyta, kad optimali vandeninių APM tirpalų koncentracija, užtikrinanti maksimalų sukibties darbą, – 0,099 %. Cemento tešloje ši APM koncentracija, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės, yra lygi 0,03 %. Kad būtų galima palyginti ir įvertinti APM rūšies ir maišyklės konstrukcijos efektyvumą, pateikiamos cemento tešlos tankio pokyčio nuo maišymo trukmės kreivės, kai visų rūšių APM koncentracija joje – 0,03 %. Iš jų matyti, kad naudojant tiek horizontalią, tiek vertikalią maišyklę, efektyviausias APM priedas yra „Ufapore TCO“, o mažiausiai efektyvūs – sulfonolas su kaulų klijais ir „Ufapore CC 85“. Atliktais tyrimais taip pat nustatyta, kad, naudojant bet kokią APM, vertikali maišyklė yra efektyvesnė už horizontalią (4.1 pav. a ir b).



4.1 pav. APM rūšies ir maišymo horizontalia (a) ir vertikalia (b) maišykle trukmės poveikis cemento tešlos tankio pokyčiui, kai APM koncentracija 0,03 %:

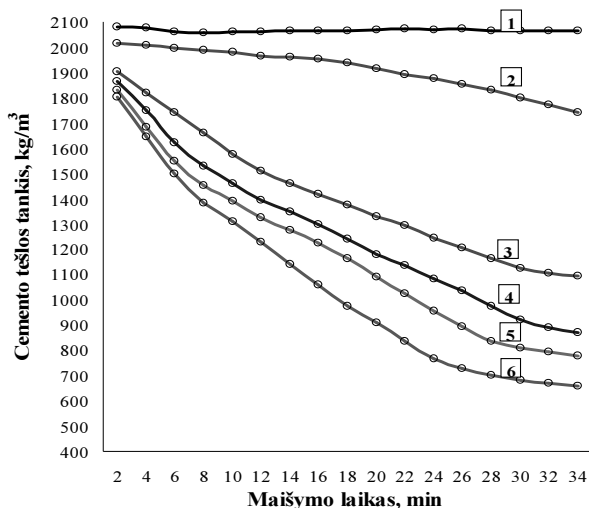
1 – be APM; 2 – sulfonolas su kaulų klijais; 3 – „Ufapore CC 85“;
4 – „PB-2000“; 5 – „Ufapore TP 707“; 6 – „Ufapore CC“; 7 – „Ufapore TCO“

Fig. 4.1. Influence of surfactant type and mixing time in the horizontal (a) or vertical (b) type mixer on variation of density in fresh cement paste when concentration of surfactant is 0.03%:

1 – without surfactant; 2 – sulfonol with bone glue; 3 – “Ufapore CC 85”;
4 – “PB-2000”; 5 – “Ufapore TP 707”; 6 – “Ufapore CC”; 7 – “Ufapore TCO”

APM koncentracijos ir maišymo trukmės horizontalioje maišyklėje poveikis cemento tešlos tankiui. 3 skyriuje nustatyta, kad, priklausomai nuo vandeninių APM tirpalų rūšies, didžiausios sukibties darbo vertės gautos jų koncentracijai kintant 0,033–0,165 % ribose. Tai atitinka 0,01–0,05 % APM koncentracijas cemento tešloje, kurios V/C = 0,3, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės. Didinant vandeninių APM tirpalų koncentraciją, jų sukibties darbo vertės lieka tokios pat arba pradeda mažėti, o tai neigiamai veikia hidrofobinių intarpų vilgymo procesą. Atsižvelgiant į tai, cemento tešlos tankio tyrimai atlikti APM koncentracijai joje kintant 0,01–0,09 % ribose.

APM koncentracijos ir maišymo trukmės horizontalioje maišyklėje poveikio cemento tešlos tankiui tyrimo rezultatai parodė, kad cemento tešlos, maišomos be APM priedo horizontalioje maišyklėje, tankis kito 2079–2056 kg/m³ ribose (4.2 pav. 1 kreivė). APM „Ufapore TCO“ koncentracijai cemento tešloje kintant nuo 0,01 iki 0,09 %, jos tankis kito 2017–660 kg/m³ ribose. Tai yra 2,5–213,3 % mažiau, palyginti su cemento tešlos be APM priedo tankio tyrimo rezultatais. Kai minėtos APM koncentracija yra 0,03 % ir didesnė, cemento tešlos tankio pokytis yra didelis jau pirmosiomis maišymo horizontalioje maišyklėje minutėmis (4.2 pav. 3–6 kreivės).



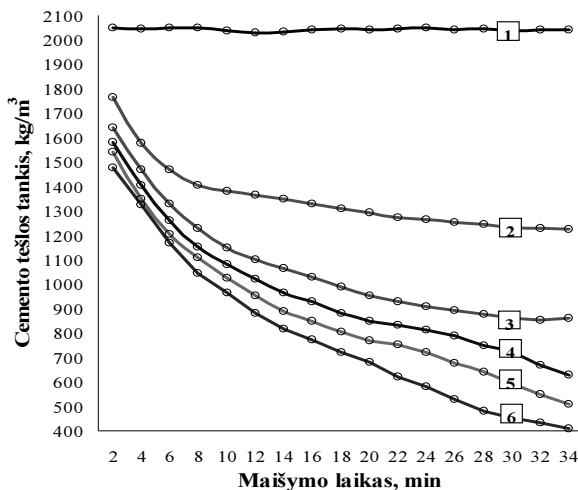
4.2 pav. APM „Ufapore TCO“ koncentracijos ir maišymo trukmės poveikis cemento tešlos, maišomos horizontalioje maišyklėje, tankio pokyčiui:

1 – be APM; 2 – 0,01 %; 3 – 0,03 %; 4 – 0,05 %; 5 – 0,07 %; 6 – 0,09 %

Fig. 4.2. Influence of “Ufapore TCO” surfactant concentration and mixing time in the horizontal type mixer on variation of density in fresh cement paste:

1 – without surfactant; 2 – 0.01%; 3 – 0.03%; 4 – 0.05%; 5 – 0.07%; 6 – 0.09%

APM koncentracijos ir maišymo trukmės vertikalioje maišyklėje poveikis cemento tešlos tankiui. APM koncentracijos ir maišymo trukmės vertikalioje maišyklėje poveikio cemento tešlos tankiui tyrimo rezultatai parodė, kad cemento tešlos, maišomos be APM priedo vertikalioje maišyklėje, tankis, priklausomai nuo maišymo laiko, kinta 2049–2029 kg/m^3 ribose (4.3 pav. 1 kreivė). APM „Ufapore TCO“ koncentracijai kintant nuo 0,01 iki 0,09 %, jos tankis kito 1764–409 kg/m^3 ribose. Tai yra 15,6–398,5 % mažiau, palyginti su cemento tešlos be APM priedo tankio tyrimo rezultatais. Esant visoms minėtos APM koncentracijoms, cemento tešlos tankio pokytis taip pat yra didelis jau pirmosiomis maišymo vertikalioje maišyklėje minutėmis (4.3 pav. 2–6 kreivės).



4.3 pav. APM „Ufapore TCO“ koncentracijos ir maišymo trukmės poveikis cemento tešlos, maišomos vertikalioje maišyklėje, tankio pokyčiui:

1 – be APM; 2 – 0,01 %; 3 – 0,03 %; 4 – 0,05 %; 5 – 0,07 %; 6 – 0,09 %

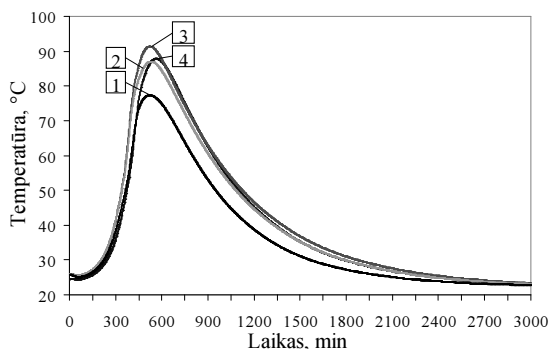
Fig. 4.3. Influence of „Ufapore TCO“ surfactant concentration and mixing time in the vertical type mixer on variation of density in fresh cement paste:

1 – without surfactant; 2 – 0.01%; 3 – 0.03%; 4 – 0.05%; 5 – 0.07%; 6 – 0.09%

Atliktų tyrimų rezultatų analizė rodo, kad naudojant APM „Ufapore TCO“, cemento tešlos tankis mažėja, ilgėjant maišymo trukmei ir didėjant APM koncentracijai (4.1 ir 4.2 pav.). Norint tyrimų duomenis pritaikyti praktikoje, reikia parinkti optimalią maišymo trukmę, kuri atitiktų kuriamo kompozito gamybos pocius. Ši maišymo trukmė neturėtų viršyti 8–10 minučių, o APM efektyvumas turi būti vertinamas atsižvelgiant į šį rodiklį. Taigi gauname, kad

efektyviausia APM yra „Ufapore TCO“. Kai minėtos APM koncentracija yra 0,03 %, cemento tešlos tankio vertė, kai cemento tešla maišoma vertikaloje maišykėje 10 minučių, mažėja iki 1147 kg/m^3 . Tai yra 77,5 % mažiau, palyginti su cemento tešlos be APM priedo tankio tyrimo rezultatais.

APM koncentracijos poveikis portlandcemenčio hydratacijai. Atlikta literatūros analizė rodo, kad skirtingos rūšies APM gali lemti portlandcemenčio hydrataciją, todėl maišymo metu cemento tešloje suformuotos oro tuštumos gali pradėti jungtis tarpusavyje ir taip suirti arba pasišalinti iš jos. Atlikti tyrimai rodo, kad efektyviausia iš visų APM yra „Ufapore TCO“, kai jos koncentracija cemento tešloje, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės, kinta 0,01–0,05 % ribose. Siekiant nustatyti šių koncentracijų APM priedo poveikį portlandcemenčio hydratacijai, buvo atlikti lyginamieji cemento tešlos su APM „Ufapore TCO“ priedu ir be jo tyrimai. Portlandcemenčio hydratacijos metu buvo fiksuoti išsiskyrusios egzoterminės šilumos temperatūrų parametrai, kurie pateikti 4.4 paveiksle.



4.4 pav. APM „Ufapore TCO“ koncentracijos poveikis portlandcemenčio hydratacijos egzoterminiai reakcijai:

1 – be APM; 2 – 0,01 %; 3 – 0,03 %; 4 – 0,05 %

Fig. 4.4. Influence of „Ufapore TCO“ surfactant concentration on exothermal reaction of hydration process of Portland cement:

1 – without surfactant; 2 – 0.01%; 3 – 0.03%; 4 – 0.05%

Atliktų tyrimų duomenų analizė parodė, kad portlandcemenčio be APM priedo hydratacijos temperatūra buvo mažiausia – 77,3 °C, o hydratacijos procesas pasiekė maksimumą po 522 min t.y po 8 h 42 min (4.4 pav. 1 kreivė). 0,01 % koncentracijos APM „Ufapore TCO“ padidino maksimalią portlandcemenčio hydratacijos temperatūrą iki 87,0 °C ir tik 8 min pailgino šį

procesą – maksimumas pasiektas po 530 min, t. y. po 8 h ir 50 min (4.4 pav. 2 kreivė). Padidinus minėtos APM koncentraciją cemento tešloje iki 0,03 %, maksimali portlandcemenčio hidratacijos temperatūra dar padidėjo iki 91,4 °C, o hidratacijos procesas pailgėjo tik 4 min – maksimumas pasiektas po 526 min, t.y po 8 h ir 46 min (4.4 pav. 3 kreivė). Toliau didinant APM „Ufapore TCO“ koncentraciją cemento tešloje iki 0,05 %, maksimali portlandcemenčio hidratacijos temperatūra sumažėjo iki 87,8 °C, o hidratacijos procesas sulėtėjo 40 min – pasiekė maksimumą po 562 min, t. y. po 9 h ir 22 min (4.4 pav. 4 kreivė). Tyrimas buvo baigtas praėjus 50 h (2 paroms ir 2 h), kai visų tiriamų cemento tešlos mišinių temperatūra pasiekė vienodą vertę ~ 22,7 °C. Atlikus šį tyrimą nustatyta, kad visų koncentracijų APM „Ufapore TCO“ priedas didina portlandcemenčio hidratacijos temperatūrą ir praktiškai nelėtina šio proceso. Optimalus minėto APM priedo kiekis cemento tešloje yra 0,03 %, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės. Jis 18,2 % padidina maksimalią portlandcemenčio hidratacijos temperatūrą ir tik 4 min sulėtina jo hidratacijos procesą, palyginti su cemento tešlos be APM priedo tyrimo duomenimis.

4.2. Cemento akmenis tyrimai

Norint išsiaiškinti skirtingų technologinių veiksnių poveikį kuriamos kompozitinės medžiagos matricos tankiui, vien tik cemento tešlos tankio nustatyti nepakanka. Literatūros analizė rodo, kad daugelis APM lėtina portlandcemenčio hidrataciją. Oro tuštumos cemento tešloje turi ribotą egzistavimo trukmę, todėl sulėtinus šį procesą, bendrasis suformuotų oro tuštumų tūris cemento akmenyje gali sumažėti. Šiame skyriuje tirtas skirtingų technologinių veiksnių, tokių kaip APM rūšis, jos koncentracija, maišyklės konstrukcija ir maišymo trukmė joje, poveikis cemento akmens tankio pokyčiui. Cemento tešlos tankio poveikio cemento akmens tankiui tyrimai rodo, kad mažesnis cemento tešlos tankis lemia mažesnę cemento akmens tankį esant visoms APM koncentracijoms ir maišymo laikui, o cemento tešlos maišymui naudojant tiek vertikalią, tiek horizontalią maišyklę. Cemento akmens bandiniai formuoti iš cemento tešlos, kurios V/C = 0,3.

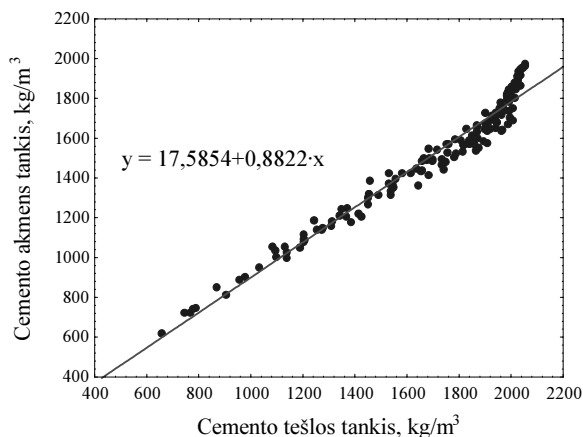
Cemento akmenis, gauto horizontalioje maišyklėje, tankis. Tyrimo duomenų analizė rodo, kad, maišant cemento tešlą be APM priedo horizontalioje maišyklėje, cemento akmenis tankis, priklausomai nuo maišymo trukmės, kinta 2049–2036 kg/m³ ribose. Mažiausiai efektyvios APM yra sulfonolas su kaulų kljais ir „Ufapore CC 85“. Jų koncentracijai kintant 0,01–0,09 % ribose, cemento akmenis tankis atitinkamai kito 1975–1564 kg/m³ ir

1961–1502 kg/m³ ribose. Tai yra 3,4–30,6 % ir 4,2–36,0 % mažiau, palyginti su cemento akmens be APM priedo tankiu. APM „PB-2000“ ir „Ufapore TP 707“ koncentracijai kintant 0,01–0,09 % ribose, cemento akmens tankis atitinkamai kito 1955–1001 kg/m³ ir 1862–810 kg/m³ ribose. Tai yra 4,5–104,1 % ir 9,7–152,2 % mažiau, palyginti su cemento akmens be APM priedo tankiu. Efektyviausios APM yra „Ufapore CC“ ir „Ufapore TCO“. Jų koncentracijai kintant 0,01–0,09 % ribose, cemento akmens tankis atitinkamai kito 1748–720 kg/m³ ir 1688–620 kg/m³ ribose. Tai yra 16,9–183,8 % ir 21,0–229,5 % mažiau, palyginti su cemento akmens be APM priedo tankiu.

Tyrimo duomenų analizė parodė, kad didesnis cemento tešlos tankis (ρ_{ct}) lemia didesnę cemento akmens tankį (ρ_{ca}) ir atvirkščiai. Sudaryta regresinė lygtis, išreiškianti jų tarpusavio ryšį:

$$\rho_{ca} = 17,5854 + 0,8822 \cdot \rho_{ct} \quad (4.1)$$

su kvadratinu nuokrypiu $s_e = 69,87 \text{ kg/m}^3$ ir determinacijos koeficientu $R^2_{pca} = 0,961$, kuris rodo, kad cemento akmens tankio variacija vidutiniškai 96 % priklauso nuo cemento tešlos tankio. Tai įrodo, kad APM ir horizontalia maišykle cemento tešloje suformuotos oro tuštos yra pakankamai patvarios. Portlandcemenčio hidratacijos metu jos praktiškai nesijungia tarpusavyje, todėl tik mažas jų kiekis suyra ir išsiskiria iš cemento tešlos. Cemento tešlos, maišomos horizontalia maišykle, tankio poveikio cemento akmens tankiui tyrimo duomenų rezultatai pateikti 4.5 paveiksle.



4.5 pav. Cemento tešlos, maišomos horizontalioje maišyklėje, tankio poveikis cemento akmens tankiui

Fig. 4.5. Influence of fresh cement paste density on hardened cement paste density when mixed in the horizontal type mixer

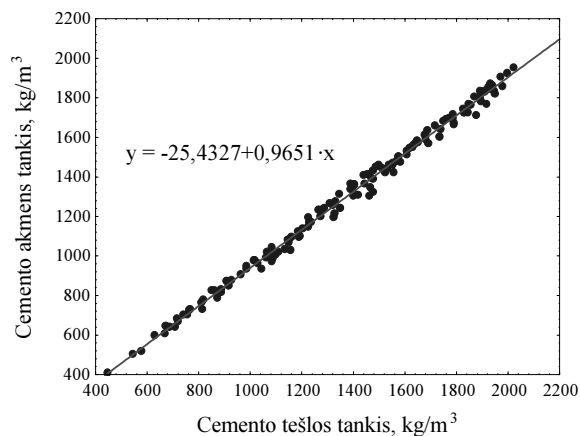
Cemento akmenis, gauto vertikalioje maišyklėje, tankis. Tyrimo duomenų analizė rodo, kad maišant cemento tešlą be APM priedo vertikalioje maišyklėje, cemento akmenis tankis, priklausomai nuo maišymo trukmės, kinta 2033–2021 kg/m³ ribose. Mažiausiai efektyvios APM taip pat yra sulfonolas su kaulų klėjais ir „Ufapore CC 85“. APM koncentracijai kintant 0,01–0,09 % ribose, cemento akmenis tankis atitinkamai kito 1955–1460 kg/m³ ir 1925–1325 kg/m³ ribose. Tai yra 3,7–38,8 % ir 5,3–53,0 % mažiau, palyginti su cemento akmenis be APM priedo tankiu. „PB-2000“ ir „Ufapore TP 707“ APM koncentracijai kintant 0,01–0,09 % ribose, cemento akmenis tankis atitinkamai kito 1864–994 kg/m³ ir 1589–648 kg/m³ ribose. Tai yra 8,7–103,9 % ir 27,6–212,8 % mažiau, palyginti su cemento akmenis be APM priedo tankiu. Efektyviausios APM yra „Ufapore CC“ ir „Ufapore TCO“. Jų koncentracijai kintant 0,01–0,09 % ribose, cemento akmenis tankis atitinkamai kito 1574–610 kg/m³ ir 1505–408 kg/m³ ribose. Tai yra 28,8–232,3 % ir 34,7–396,8 % mažiau, palyginti su cemento akmenis be APM priedo tankiu.

Tyrimo duomenų analizė parodė, kad didesnis cemento tešlos tankis (ρ_{ct}) taip pat lemia didesnę cemento akmenis tankį (ρ_{ca}) ir atvirkščiai. Sudaryta regresinė lygtis, išreiškianti jų tarpusavio ryšį:

$$\rho_{ca} = -25,4327 + 0,9651 \cdot \rho_{ct} \quad (4.2)$$

su kvadratinio nuokrypiu $s_e = 27,21$ kg/m³ ir determinacijos koeficientu $R^2_{\rho_{ca}} = 0,994$, kuris rodo, kad cemento akmenis tankio variacija vidutiniškai 99 % priklauso nuo cemento tešlos tankio. Tai įrodo, kad, cemento tešlą maišant vertikalioje maišyklėje, naudojant APM suformuojamos patvaresnės (mažesnio skersmens) oro tuštumos, palyginti su horizontalioje maišyklėje maišytos cemento tešlos tyrimo rezultatais. Šios oro tuštumos tarpusavyje nesijungia, todėl nesuyra ir neišsiskiria iš cemento tešlos vykstant portlandcemenčio hidratacijai. Cemento tešlos, maišomos vertikalioje maišyklėje, tankio poveikio cemento akmenis tankiui tyrimo duomenų rezultatai pateikti 4.6 paveiksle.

Tyrimo duomenų analizė rodo, kad vertikali maišyklė yra efektyvesnė už horizontalią. Pastebėta, kad maišant cemento tešlą su visų rūšių APM priedu, esant vienodoms jų koncentracijoms, cemento akmenis bandinių tankio pokytis maišant vertikalioje maišyklėje yra didesnis, palyginti su bandinių pokyčiais, gautais horizontalioje maišyklėje. Tolesni cemento akmenis tyrimai atlikti tik su bandiniais, kurie formuoti vertikalioje maišyklėje.



4.6 pav. Cemento tešlos, maišomos vertikalioje maišyklėje, tankio poveikis cemento akmens tankiui

Fig. 4.6. Influence of fresh cement paste density on hardened cement paste density when mixed in the vertical type mixer

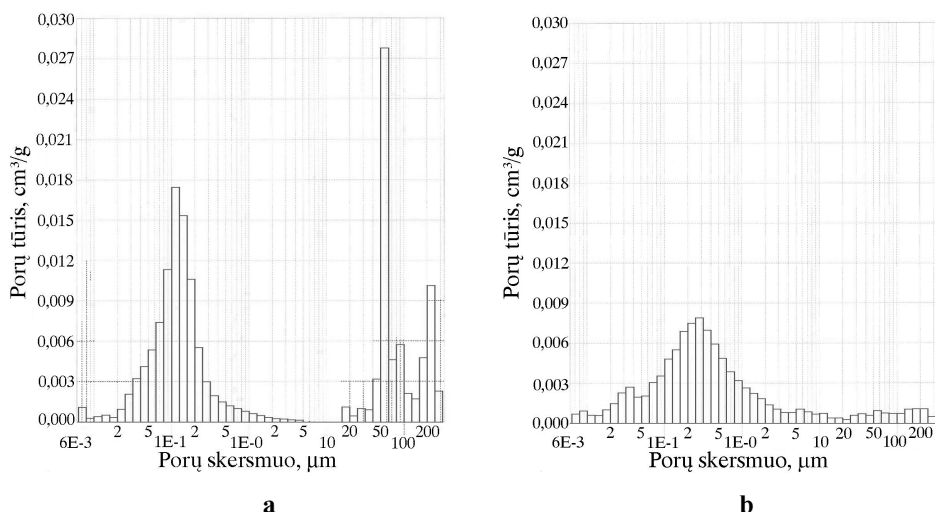
Cemento akmens, gauto vertikalioje maišyklėje, poringumas. Kaip jau buvo minėta anksčiau, norint tyrimų duomenis pritaikyti praktikoje, reikia parinkti optimalią maišymo trukmę, kuri atitiktų kuriamos kompozitinės medžiagos gamybos pociusą. Atsižvelgiant į tai, cemento akmens poringumas buvo nustatomas bandiniuose, gautuose vertikalioje maišyklėje po 8 minučių maišymo. Maišymo metu visų rūšių APM priedo koncentracija cemento tešloje buvo 0,03 %, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės.

Tyrimo duomenų analizė rodo, kad tos pačios koncentracijos skirtingų rūšių APM poveikis cemento akmens poringumui yra skirtingas. Cemento akmens poringumo tyrimo rezultatai pateikti 4.7–4.9 paveiksluose. ir 4.1 lentelėje.

Tyrimo duomenų analizė rodo, kad naudojant sulfonolą su kaulų klijais, cemento akmenyje didžiausią tūrį sudaro 200,00–210,00 μm, 0,08–0,20 μm ir 50,00–62,00 μm skersmens poros. Pastarųjų kiekis yra ypač didelis, tačiau visiškai neaptikta 5,00–17,00 μm skersmens porų (4.7 pav. a). Toks netolygus porų skersmens pasiskirstymas cemento akmenyje, naudojant minėtą APM, negali užtikrinti pastovių jo savybių.

Naudojant APM „Ufapore CC 85“, cemento akmenyje didžiausią tūrį sudaro 0,17–0,41 μm skersmens poros. Taip pat pastebėtas nemažas 0,08–0,17 ir 0,41–1,00 μm skersmens porų kiekis (4.7 pav. b). Toks porų skersmens

pasiskirstymas cemento akmenyje, naudojant minėtą APM, lemia ne tik pastoviasias jo savybes, bet ir mažiausią tankį.



4.7 pav. APM rūšies poveikis cemento akmens poringumui:

a – sulfonolas su kaulų klijais; b – „Ufapore CC 85“

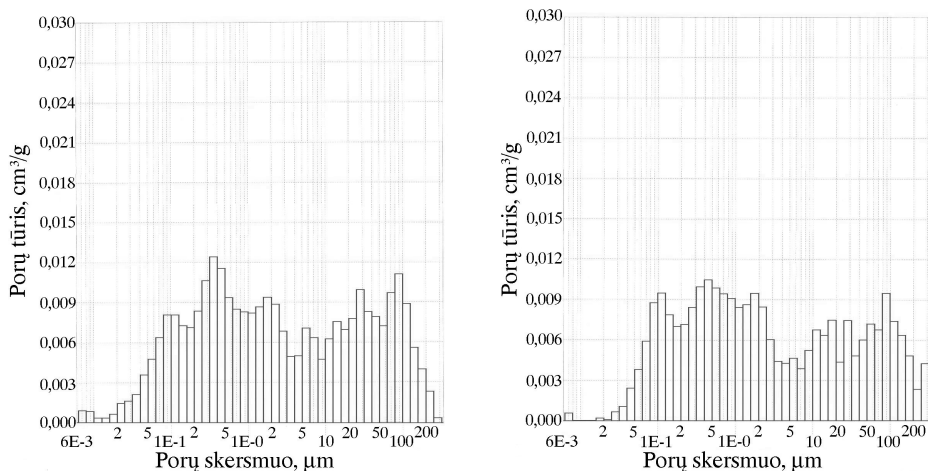
Fig. 4.7. Influence of surfactant type on porosity of hardened cement paste:

a – sulfonol with bone glue; b – “Ufapore CC 85”

Tyrimo duomenų analizė rodo, kad, naudojant APM „PB-2000“, cemento akmenyje didžiausią tūrį sudaro 0,26–0,62 μm ir 62,00–100,00 μm skersmens poros (4.8 pav. a). Panašūs duomenys gauti naudojant APM „Ufapore CC“. Didžiausią tūrį cemento akmenyje sudaro 0,08–3,20 μm ir 10,00–170,00 μm skersmens poros (4.8 pav. b). Tai neblogas porų skersmens pasiskirstymas cemento akmenyje, naudojant minėtas APM, tačiau didesnio skersmens porų nemažas tūris neužtikrins pastovių jo savybių.

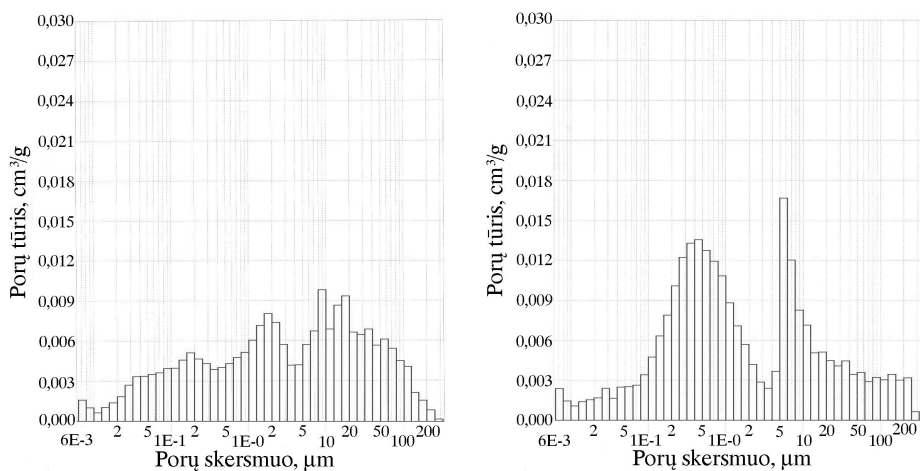
Naudojant APM „Ufapore TP 707“, cemento akmenyje didžiausią tūrį sudaro 1,30–3,20 μm ir 6,20–40,00 μm skersmens poros (4.9 pav. a). Toks porų skersmens pasiskirstymas cemento akmenyje, naudojant minėtą APM, lemia ne tik pastovias jo savybes, bet ir pakankamai mažą tankį.

Tyrimo duomenų analizė rodo, kad naudojant APM „Ufapore TCO“, cemento akmenyje didžiausią tūrį sudaro 0,13–1,70 μm ir 5,00–13,00 μm skersmens poros (4.9 pav. b). Tai optimalūs cemento akmens poringumo rodikliai, gauti naudojant minėtą APM, lemiantys mažą jo tankį ir pastovias savybes.



4.8 pav. APM rūšies poveikis cemento akmens poringumui:
a – „PB-2000“; b – „Ufapore CC“

Fig. 4.8. Influence of surfactant type on porosity of hardened cement paste:
a – “PB-2000”; b – “Ufapore CC”



4.9 pav. APM rūšies poveikis cemento akmens poringumui:
a – „Ufapore TP 707“; b – „Ufapore TCO“

Fig. 4.9. Influence of surfactant type on porosity of hardened cement paste:
a – “Ufapore TP 707”; b – “Ufapore TCO”

4.1 lentelė. Cemento akmens poringumo savybės**Table 4.1.** Porosity properties of hardened cement paste

APM pavadinimas	Savybės			
	Bendras porų tūris, cm ³ /g	Bendras porų sienelių paviršiaus plotas, m ² /g	Bendras poringumas, %	Teorinis poringumas, %
sulfonolas su kaulų klijais	0,1630	5,0873	17,1	47,5
„Ufapore CC 85“	0,1021	3,9136	11,2	45,3
„Ufapore TP 707“	0,2127	5,0510	21,7	49,0
„PB-2000“	0,2967	4,8966	30,6	48,5
„Ufapore CC“	0,2680	3,2611	28,4	47,0
„Ufapore TCO“	0,2571	6,1441	21,5	58,3

Iš cemento akmens poringumo tyrimo rezultatų, pateiktų 4.1 lentelėje, matome, kad didžiausias teorinis poringumas gautas naudojant APM „Ufapore TCO“. Tai patvirtina anksčiau atliktų ir aptartų 4.1 ir 4.2 skyriuose tyrimų rezultatus, kad iš tirtų APM rūšių efektyviausia yra „Ufapore TCO“.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad efektyviausiai cemento tešlos tankis mažinamas, kai APM koncentracija kinta 0,01–0,03 % ribose. Naudojant bet kokios rūšies, 0,03 % koncentracijos APM, vertikali maišyklė yra efektyvesnė už horizontalią. Taip pat nustatyta, kad, naudojant daugelį APM rūšių, cemento tešlos tankis mažėja, ilgėjant jos maišymo trukmei. Optimali maišymo trukmė yra 8–10 minučių (4.1 pav. a ir b).
2. Eksperimentiniai tyrimai patvirtina, kad vandeninių APM tirpalų paviršiaus įtempis lemia cemento tešlos poringumą ir sukibties darbą, kuris įvertina APM efektyvumą. APM, kurių koncentracija yra 0,03 %, pagal efektyvumą galima išdėstyti tokia mažėjančia tvarka: „Ufapore TCO“, „Ufapore CC“, „Ufapore TP 707“, „PB-2000“, „Ufapore CC 85“ ir sulfonolas su kaulų klijais.
3. Naudojant 0,03 % koncentracijos APM „Ufapore TCO“, cemento tešlos, maišomos vertikaliajoje maišyklėje 10 minučių, tankis mažėja iki 1147 kg/m³. Tai yra 77,5 % mažiau, palyginti su cemento tešlos be APM priedo tankio tyrimo rezultatais.
4. Tyrimo duomenų analizė rodo, kad cemento tešlos tankis lemia cemento akmens tankį. Sudarytos regresinės lygtys, išreiškiančios jų tarpusavio ryšį.

Remiantis šiomis lygtimis pagal porizuotos cemento tešlos tankį galima iš karto apskaičiuoti cemento akmens tankį.

5. Panaudojus vienodos koncentracijos visų rūšių APM, cemento akmens bandinių tankio pokytis maišant vertikaliajoje maišyklėje buvo didesnis, palyginti su tankiu bandinių, gautų horizontaliojoje maišyklėje. Cemento tešlos tankio (ρ_{ct}) ir cemento akmens tankio (ρ_{ca}) tarpusavio sąryšis, maišant vertikalia maišykle, išreiškiamas $\rho_{ca} = -25,4327 + 0,9651 \cdot \rho_{ct}$ lygtimi ($R^2 = 0,994$, $s_e = 27,21 \text{ kg/m}^3$).
6. Cemento akmens tankio tyrimais nustatyta, kad efektyviausia APM yra „Ufapore TCO“. Naudojant 0,03 % koncentracijos minėtą APM, cemento akmens tankis po 8 minučių maišymo vertikaliajoje maišyklėje, sumažėjo 73,0 %, palyginti su cemento akmens be APM priedo tyrimo rezultatais.
7. Ištyrus cemento akmens poringumą, kai visų rūšių APM koncentracija – 0,03 %, apskaičiuota, kad didžiausias teorinis jo poringumas (58,3 %) gautas naudojant APM „Ufapore TCO“. Kitos cemento akmens savybės, panaudojus minėtą APM, buvo šios: bendras porų tūris – $0,2571 \text{ cm}^3/\text{g}$, bendras porų sienelių paviršiaus plotas – $6,1441 \text{ m}^2/\text{g}$, bendras poringumas – 21,5 %. Naudojant 0,03 % koncentracijos APM „Ufapore TCO“, didžiausią tūrį, kintantį $0,0064\text{--}0,0135 \text{ cm}^3/\text{g}$ ir $0,0070\text{--}0,0165 \text{ cm}^3/\text{g}$ ribose, sudaro atitinkamai $0,13\text{--}1,70 \text{ }\mu\text{m}$ ir $5,00\text{--}13,00 \text{ }\mu\text{m}$ skersmens poros.
8. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais, kuriamos kompozitinės medžiagos formavimui turi būti naudojami šie technologiniai parametrai ir priedai:
 - vertikali maišyklė;
 - maišymo trukmė vertikaliajoje maišyklėje – 8 minutės;
 - APM priedas „Ufapore TCO“;
 - „Ufapore TCO“ kiekis kompozitinės medžiagos formavimo mišinyje – 0,03 %, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės.

Kompozitinės medžiagos savybių nustatymas

5.1. Tankis

Sukurti 350 kg/m^3 tankio kompozitinę medžiagą nėra sunku. Tinkamai parinkus reikiamą APM rūšį ir jos kiekį, panaikinama intarpų iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų hidrofobinė prigimtis ir suformuojamos oro tuštumos jos matricoje. Kadangi APM kiekis skaičiuojamas nuo cemento masės, jis yra pakankamas, kad būtų porizuota net palyginti klampi matrica. Matricos kiekis minėto tankio kompozitinės medžiagos tūryje yra didelis, todėl galima naudoti mažesnius kaip 20,00 mm dydžio intarpus iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų, kurių mažesnis savitasis paviršius. Matrica, dengdama intarpus storu sluoksniu, gerai užpildo ir tarp jų esančias tuštumas. Pakankamas vandens kiekis matricoje ir mažas intarpų savitasis paviršius užtikrina gerą intarpų vilgymą. 350 kg/m^3 tankio kompozitinėje medžiagoje reikiamas $V/C = 0,50$.

250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos tūryje matricos kiekis yra mažesnis, o intarpų dydis yra toks pat kaip ir 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose (mažiau kaip 20,00 mm). Šie veiksniai lemia vandens, reikalingo intarpams vilgyti, trūkumą. Dėl mažesnio matricos kiekio minėto

tankio kompozitinės medžiagos tūryje APM kiekis taip pat yra mažesnis. Jis yra nepakankamas, todėl, kad būtų galima tinkamai porizuoti matricą, ji turi būti takesnė, palyginti su 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos matrica. Norint tinkamai spręsti minėtas problemas, reikia didinti vandens kiekį. 250 kg/m^3 tankio kompozitinėje medžiagoje reikiamas $V/C = 0,65$.

Kad būtų galima sukurti 150 kg/m^3 tankio kompozitinę medžiagą, jos tūryje turi būti ypač mažas matricos kiekis, nes būtent nuo jo ir priklauso, kokio tankio bus gautas gaminys. Dėl mažo matricos kiekio kompozitinės medžiagos tūryje naudoti mažesnių kaip $20,00 \text{ mm}$ dydžio tarpų negalima. Jos neužteks esančioms tarp tarpų tuštumoms užpildyti. Dėl minėtos priežasties reikia naudoti ne didesnius kaip $5,00 \text{ mm}$ dydžio tarpus iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų. Mažas matricos kiekis minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinio tūryje lemia ir mažą vandens bei APM kiekį jame. APM kiekis yra nepakankamas, kad matrica būtų tinkamai porizuota, todėl ji turi būti takesnė, palyginti su 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos matrica. Naudojant minėto dydžio tarpus, dėl jų didesnio savitojo paviršiaus dar labiau išauga vandens kiekio, reikalingo tarpams vilgyti, poreikis. Jis ir taip yra nepakankamas, todėl būtina jį didinti. 150 kg/m^3 tankio kompozitinėje medžiagoje reikiamas $V/C = 0,80$.

Tyrimo duomenų analizė parodė, kad kompozitinės medžiagos bandinių projektinis ir faktinis tankiai gali skirtis. Nustatyta, kad 150 kg/m^3 projekcinio tankio kompozitinės medžiagos bandinių faktinis tankis kito $133\text{--}166 \text{ kg/m}^3$ ribose, 250 kg/m^3 – $235\text{--}269 \text{ kg/m}^3$ ribose, o 350 kg/m^3 – $331\text{--}374 \text{ kg/m}^3$ ribose.

5.2. Makrostruktūra

Atlikti makrostruktūros tyrimai rodo, kad ji 150 , 250 ir 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose yra vienalytė. Matrica tolygiai pasiskirsto visame bandinio tūryje ir dengia tarpus tam tikro storio sluoksniu. Jos kiekis kompozitinės medžiagos bandinio tūryje bei tarpų granulimetrinė sudėtis, geometrinė forma ir paviršiaus pobūdis ir lemia bandinio makrostruktūrą.

PPS pakavimo taros atliekų trupinimo metu granulės atsiskiria viena nuo kitos perlūždamos per pačią granulę, o ne per jų sąlyčio zoną. Dėl atsivėrusių porų sudaro pažeista ir nelygi trupintų PPS pakavimo taros atliekų paviršiaus struktūra. Paviršiuje matomos įdubos ir įplyšos, susidariusios mechaniškai atskiriant PPS granules vieną nuo kitos.

Formuojant 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinius buvo naudoti ne didesni kaip $5,00 \text{ mm}$ dydžio tarpai ir taip buvo išvengta didelių

tuštumų tarp jų susidarymo. Tokio dydžio intarpai sudaryti iš vienos PPS granulės (5.1 pav. a). Tiriant minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių makrostruktūrą pastebėta, kad intarpai iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų yra padengti ypač plonu matricos sluoksniu, o jų tarpusavio sąlyčio zona yra taškinė arba linijinė (5.1 pav. b). 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinyje net ir mažos tuštumos, esančios tarp ne didesnių kaip 5,00 mm dydžio tarpų, nėra visiškai užpildytos matrica. Minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinyje tuštumos, esančios tarp tarpų, yra tarpusavyje susisiekiančios. Matricos sluoksnis, dengiantis tarpus, yra labai plonas, jame nepastebėta didesnių oro tuštumų, kurios susidarytų dėl APM naudojimo (5.1 pav. b).

**a****b**

5.1 pav. 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių makrostruktūra, kai didinimas yra:

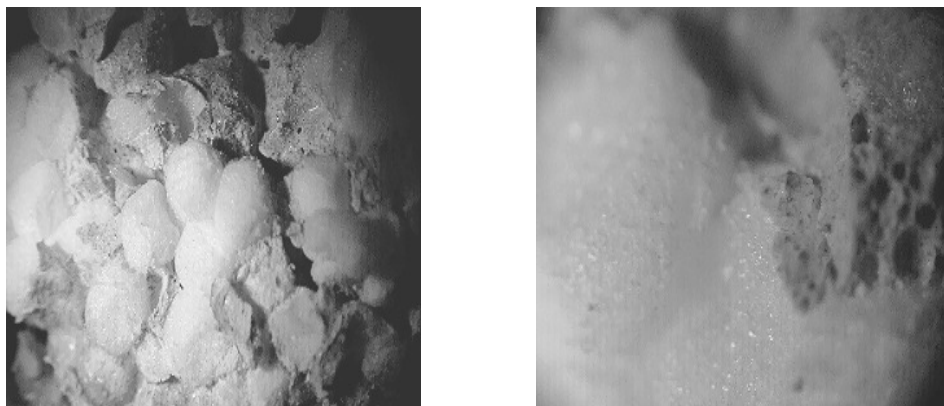
a – x6; b – x25

Fig. 5.1. Macrostructure of composite material samples with density of 150 kg/m^3 , when enlarged by:

a – x6; b – x25

Kai formuojami 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniai, jų tūryje naudojamas didesnis matricos kiekis, palyginti su 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniais, ir mažesni kaip 20,00 mm dydžio intarpai. Tiriant minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių makrostruktūrą pastebėta, kad, esant tokiam tarpų dydžiui, matrica tolygiai dengia tarpus storesniu sluoksniu, palyginti su 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniais, ir iš dalies užpildo tarp tarpų esančias tuštumas. Šios tuštumos tik kai kur yra tarpusavyje susisiekiančios. Tokio dydžio intarpai daugiausia

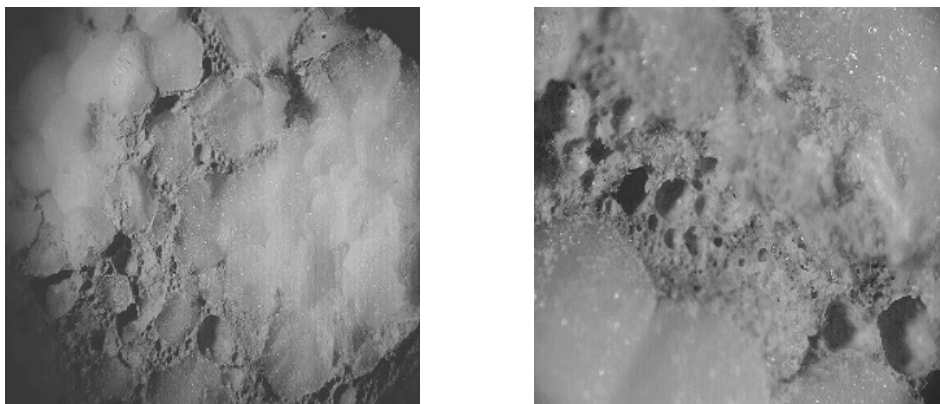
sudaryti iš keleto tarpusavyje sujungtų PPS granulių (5.2 pav. a). Minėto tankio kompozitinės medžiagos intarpų paviršiuje matomos įdubos ir įplyšos, gerai užpildytos matrica. Matricoje pastebėtos skirtingo skersmens oro tuštumos, susidariusios dėl APM naudojimo (5.2 pav. b).



5.2 pav. 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių makrostruktūra, kai didinimas yra:
a – x6; b – x25

Fig. 5.2. Macrostructure of composite material samples with density of 250 kg/m³, when enlarged by:
a – x6; b – x25

Kai formuojami 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniai, jų tūryje naudojamas didesnis matricos kiekis ir tokio pat dydžio intarpai, kaip ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose (mažesni kaip 20,00 mm). Atlikus minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių makrostruktūros tyrimus nustatyta, kad intarpai padengti storu matricos sluoksniu, palyginti su 150 ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniais. Matricos kiekis kompozitinės medžiagos bandinio tūryje yra pakankamas, kad visiškai užpildytų visas tarp intarpų esančias tuštumas. Tokio dydžio intarpai, taip pat kaip ir 250 kg/m³ tankio bandiniuose, daugiausia sudaryti iš keleto tarpusavyje sujungtų PPS granulių (5.3 pav. a). 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos intarpų paviršiuje matomos gerai užpildytos matrica įdubos. Matricoje taip pat pastebėtos skirtingo skersmens oro tuštumos, susidariusios dėl APM naudojimo. Jų kiekis yra didesnis, palyginti su 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių oro tuštumų kiekiu (5.3 pav. b).



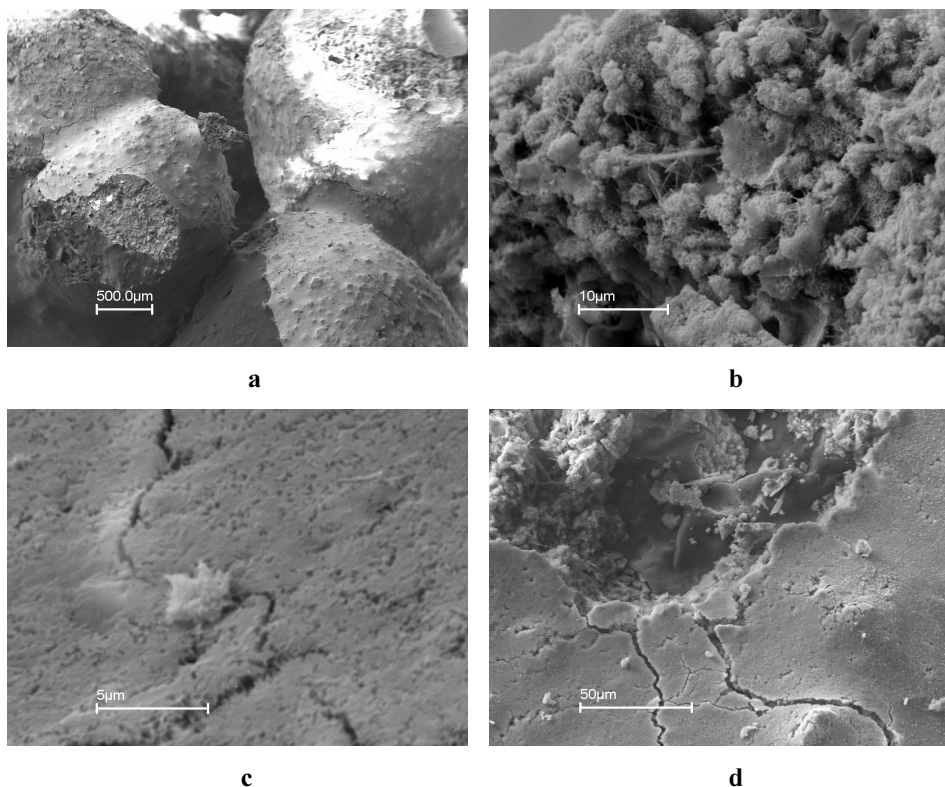
a
5.3 pav. 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių
makrostruktūra, kai didinimas yra:
a – x6; b – x25

Fig. 5.3. Macrostructure of composite material samples
with density of 350 kg/m³, when enlarged by:
a – x6; b – x25

5.3. Mikrostruktūra

Tyrimai, atlikti skenuojančiu elektroniniu mikroskopu. Mikrostruktūros tyrimai elektroniniu mikroskopu padeda apibūdinti atskirų kompozitinės medžiagos sudedamųjų dalių vidinę struktūrą ir jų sąveikos pobūdį, o tai leidžia prognozuoti kai kurias jos savybes.

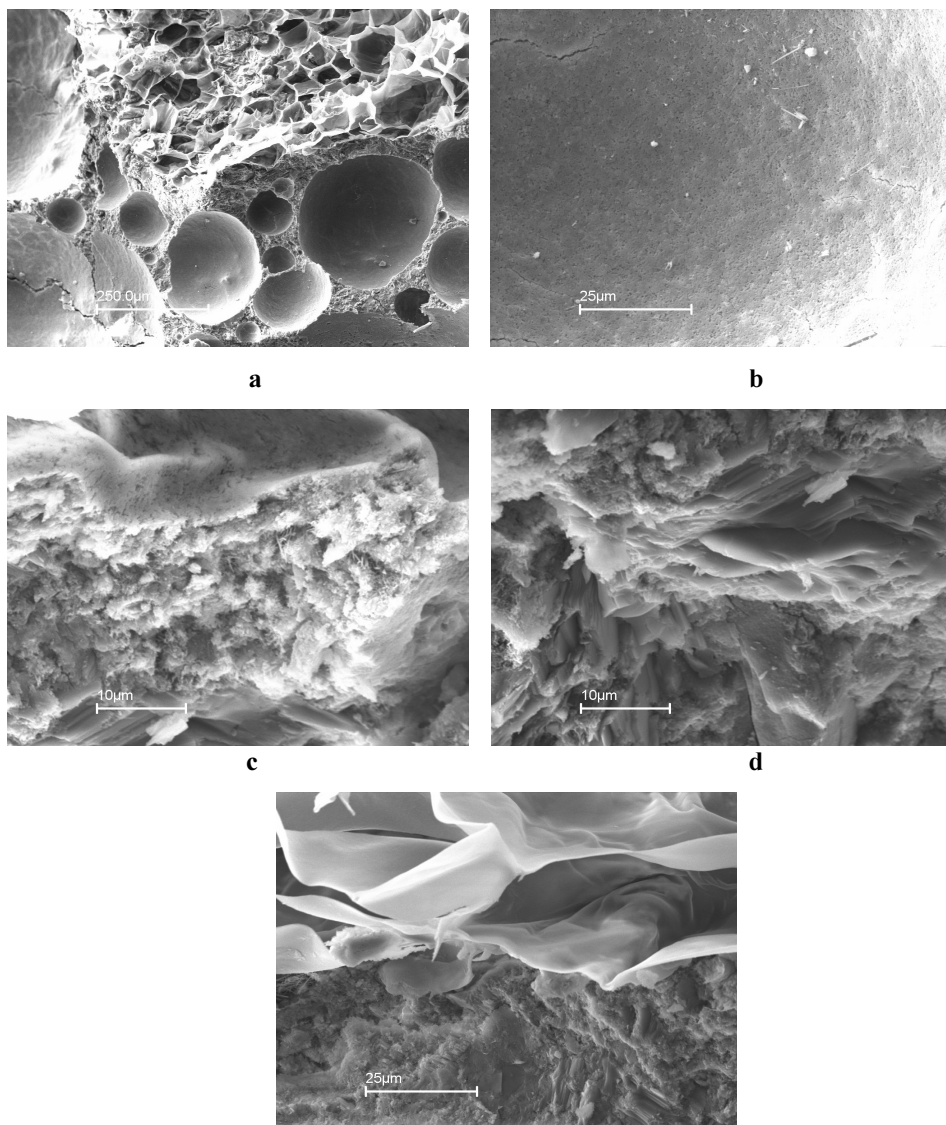
Atlikti makrostruktūros tyrimai rodo, kad ardomas 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinys suyra lūžtant matricai, o tarpai iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų daugelyje vietų nelūžta (5.4 pav. a). Kaip jau buvo minėta anksčiau, taip yra todėl, kad tarp intarpų esantis matricos sluoksnis yra ypač plonas. Minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinio matricoje, skirtingai nei 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių matricoje, porų neaptikta, tačiau pati ji yra puri (5.4 pav. b). Intarpus iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų dengiančio matricos sluoksnio paviršiuje matomi adatinės formos kristalai, sukibę su amorfine medžiaga (5.4 pav. c). Tyrimai rodo, kad 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose matricos ir intarpų sąlytis yra glaudus (5.4 pav. d).



5.4 pav. 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių mikrostruktūra:
a – intarpai, padengti matrica; b – matricos purumas; c – matricos sluoksnio paviršius;
d – matricos ir tarpų sąlyčio zona

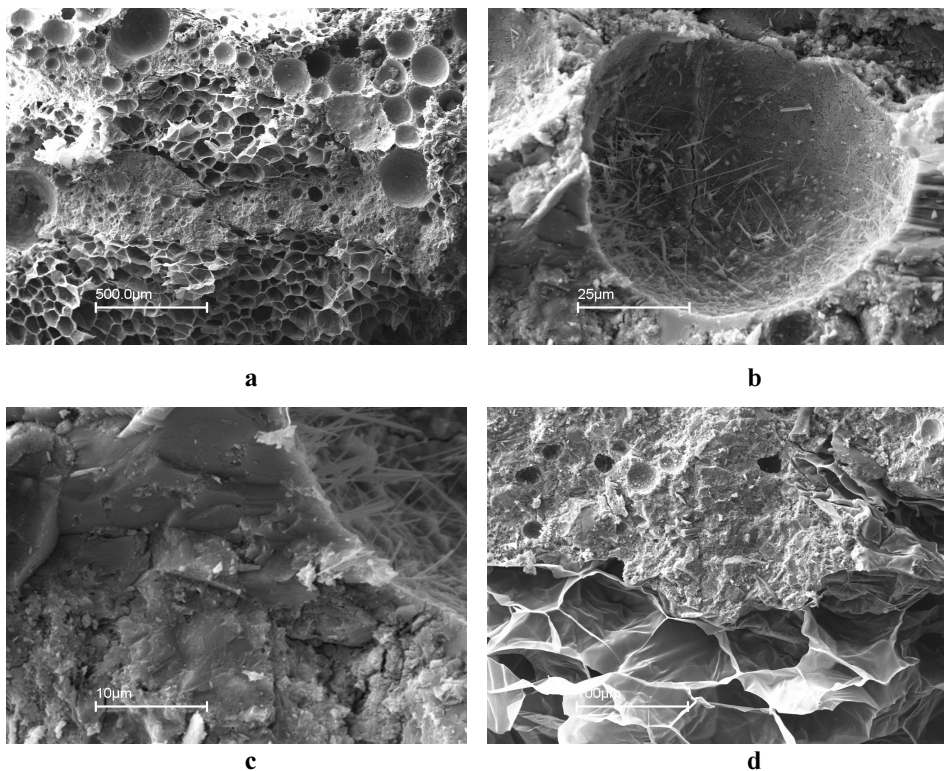
Fig. 5.4. Microstructure of composite material samples with density of 150 kg/m³:
a – inclusions coated by matrix; b – friability of the matrix; c – surface of matrix layer;
d – contact region between matrix and inclusions

Ardant 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinį, įkibę į matricą pavieniai intarpai lūžta. Vietose, kuriose yra įkibę į matricą pavieniai intarpai, lūžta ir matrica, ir intarpai. Tačiau minėto tankio bandinyje pastebėta nemažai vietų, kuriose vyrauja nelūžę intarpai, t. y. tose vietose lūžta matrica. Matricoje vyrauja įvairaus dydžio poros (5.5 pav. a). Porų sienelėse matyti mažo dydžio kristalų, o sienelių paviršiuje yra pavienių, tačiau žymiai didesnių adatinių kristalų (5.5 pav. b). Matrica vietomis yra puri, o vietomis jos tankis yra pastebimai didesnis (5.5 pav. c ir d). Tokio tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose matricos ir tarpų paviršiaus sąlytis yra glaudus (5.5 pav. e).



5.5 pav. 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių mikrostruktūra:
a – oro tuštumų pasiskirstymas matricoje; b – oro tuštumos sienelės paviršius;
c ir d – matricos purumas; e – matricos ir intarpų sąlyčio zona
Fig. 5.5. Microstructure of composite material samples with density of 250 kg/m³:
a – distribution of air voids in the matrix; b – surface of air void partition;
c and d – friability of the matrix; e – contact region between matrix and inclusions

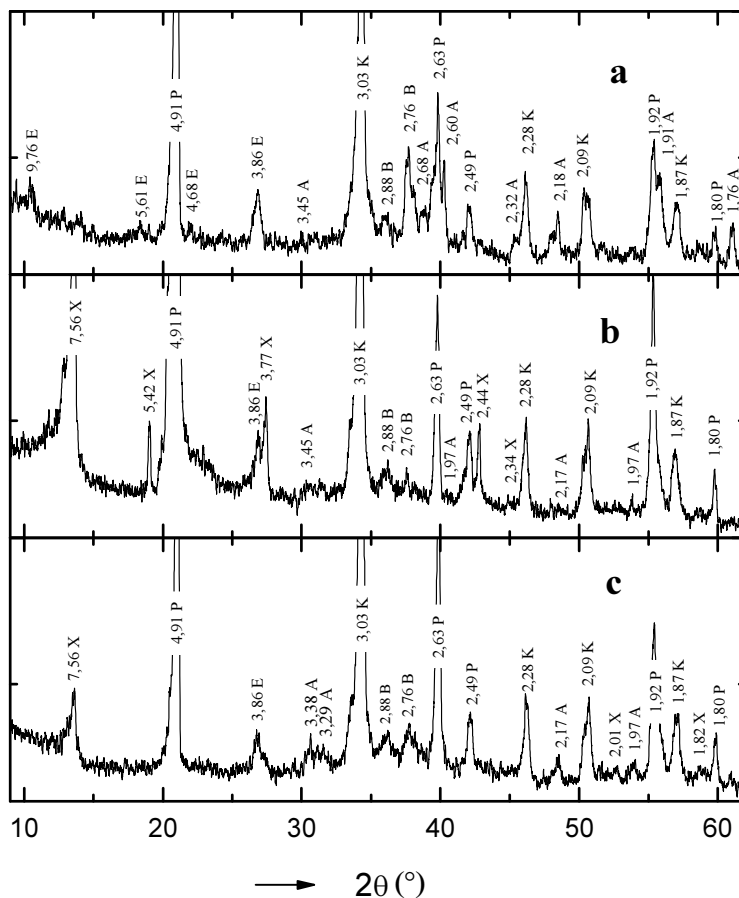
Ardant 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinį, lūžta ir matrica, ir intarpai. Matricoje vyrauja įvairaus dydžio poros (5.6 pav. a). Porų sienelėse, kaip ir 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių porų sienelėse, matomi smulkūs kristalai (5.6 pav. b). Matricoje esančių porų sienelių paviršiuje yra adatinių kristalų, kurių kiekis yra žymiai didesnis, palyginti su 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių adatinių kristalų kiekiu. Matrica nėra puri (5.6 pav. c). Tokio tankio kompozitinės medžiagos bandinio matricos ir intarpų paviršiaus sąlytis yra labai glaudus (5.6 pav. d).



5.6 pav. 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių mikrostruktūra: a – oro tuštumų pasiskirstymas matricoje; b – oro tuštumos sienelės paviršius; c – matricos purumas; d – matricos ir intarpų sąlyčio zona

Fig. 5.6. Microstructure of composite material samples with density of 350 kg/m^3 : a – distribution of air voids in the matrix; b – surface of air void partition; c – friability of the matrix; d – contact region between matrix and inclusions

Rentgenografiniai tyrimai. Atlikus 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių matricos rentgenografinę analizę, nustatyti šie mineralai: portlanditas ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), kalcitas (CaCO_3) ir nesureagavę portlandcemenčio mineralai – alitas (Ca_3SiO_5) ir belitas (Ca_2SiO_4). Minėtų tankių kompozitinės medžiagos bandinių matricai būdingos rentgenogramos pateiktos 5.7 paveiksle.



5.7 pav. 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio bandinių matricos rentgenogramos (Å):

P – portlanditas; K – kalcitas; A – alitas; B – belitas; E – etringitas;

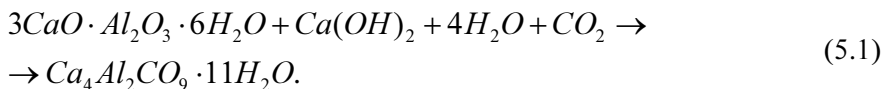
X – kalcio aluminio karbonato hidratas

Fig. 5.7. Matrix X-rays of samples with density of 150, 250 and 350 kg/m³ (Å):

P – portlandite; K – calcite; A – alite; B – belite; E – ettringite;

X – calcium aluminium carbonate hydrate

250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose vyrauja storesnis matricos sluoksnis, turintis didesnio skersmens porų. Tokio tankio kompozitinės medžiagos bandinių matricoje, kartu su anksčiau minėtais mineralais, nustatytas ir kalcio aliuminio karbonato hidratas ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{CO}_9 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) (5.7 pav. b ir c rentgenogramos). Šis junginys susidaro dėl palengvėjusios anglies dioksido (CO_2) difuzijos per porėtą kompozitinės medžiagos bandinio matricos struktūrą, drėgnoje aplinkoje reagavus trikalcio aluminatui ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) su kalcio hidroksidu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$):

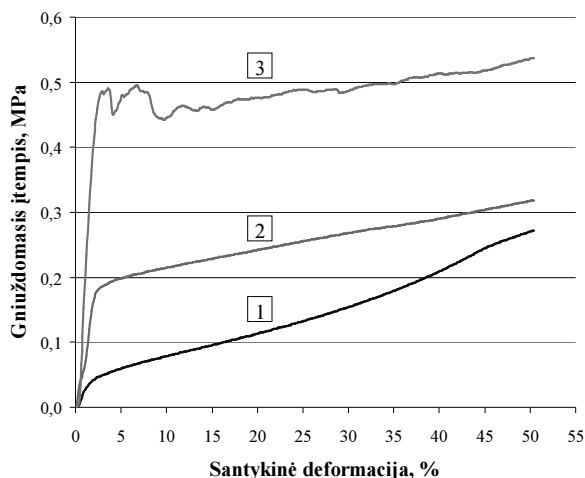


150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose vyrauja plonas matricos sluoksnis, neturintis didesnio skersmens porų, todėl anksčiau minėtas procesas nevyksta. Tokio tankio kompozitinės medžiagos bandinių matricos rentgenogramoje matomos etringito ($(\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O})$) difrakcinės smailės (5.7 pav. a rentgenograma).

Lyginant skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių matricos mikrostruktūrą, pastebėta, kad didesnio tankio bandiniuose, kietėjant matricai, susidaro didesnės kai kurių junginių (portlanditas, kalcio aliuminio karbonato hidratas) difrakcinės smailės. Tai rodo, kad matricoje, turinčioje mažesnę V/C, portlandcemenčio kietėjimo metu vyksta geresnis susidarantių junginių išsiskristalizavimo laipsnis. Šis procesas lemia ir didesnes viso kompozitinės medžiagos bandinio stiprumo savybes.

5.4. Gniuždomasis stipris

Iš gniuždomojo įtempio-santykinės deformacijos kreivės, būdingos 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniui (5.8 pav. 1 kreivė), galima teigti, kad gniuždymo metu atsirandančios santykinės deformacijos yra charakteringos tamprioms medžiagoms. Taip yra todėl, kad matricos, dengiančios intarpus, sienelių storis yra labai mažas. Dėl mažo kiekio bandinio tūryje matrica nesugeba priešintis jėgos poveikiui gniuždymo metu, todėl suyra ir deformuojasi kartu su tarpais. Minėto tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose šiam poveikiui jie priešinasi labiausiai. Kompozitinės medžiagos bandinyje vyksta tamprioji-plastinė deformacija, kol santykinė deformacija pasiekia 2,5 % vertę. Tokio tankio kompozitinės medžiagos bandinys nesuyra, net kai santykinė deformacija siekia 50 % (5.9 pav. a).



5.8 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo įtempio–santykinės deformacijos kreivės, kai bandinys deformuotas 50 %:

1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

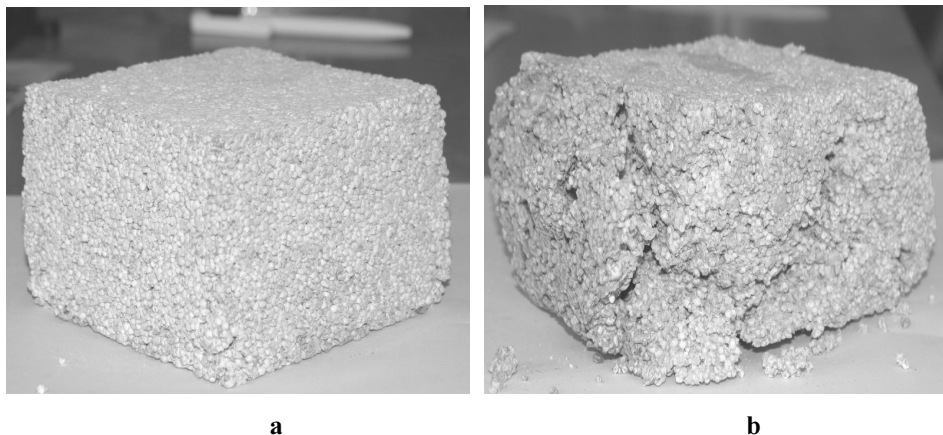
Fig. 5.8. Stress–strain curves of composite material samples with different density, when strained by 50%:

1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Iš gniuždomojo įtempio-santykinės deformacijos kreivės, būdingos 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniui (5.8 pav. 2 kreivė), galima teigti, kad gniuždymo metu atsirandančios santykinės deformacijos yra būdingos platinėms medžiagoms. Taip yra todėl, kad matricos sienelės storis yra didesnis ir ji labiau priešinasi gniuždymo jėgos poveikiui. Tačiau jos storis yra nepakankamas, ir ji taip pat suyra ir deformuojasi kartu su tarpais. 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinys suyra nepasiekęs 50 % santykinės deformacijos.

Iš gniuždomojo įtempio-santykinės deformacijos kreivės, būdingos 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniui (5.8 pav. 3 kreivė), galima teigti, kad gniuždymo metu atsirandančios santykinės deformacijos yra būdingos trapioms medžiagoms. Taip yra todėl, kad dengiančios tarpus matricos sienelės storis yra didesnis. Bandinio tūryje matricos kiekis sudaro didesnę dalį, palyginti su 150 ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių matricos kiekiu. Matricos sienelės pirmiausia suyra tose bandinio vietose, kuriose jos yra plonesnės (pasiekus 0,49 MPa gniuždomąjį įtempį), esant 3,6 % santykinėi deformacijai. Kai santykinė deformacija pasiekia 5,0 %, suyra ir storesnės matricos sienelės, gniuždomasis įtempis sumažėja iki

0,45 MPa. Toliau didėjant santykinei deformacijai, gniuždomasis įtempis didėja lėtai, nes, kaip ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinyje, suirusių matricos sienelių vietoje deformuojami intarpai, taigi apkrovą perima jie ir stipresnės (storesnės ir nepažeistos) matricos sienelės dalys. 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinys taip pat suyra nepasiekęs 50 % santykinės deformacijos (5.9 pav. b).



5.9 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių suirimo pobūdis, kai bandinys deformuotas 50 %:

a – 150 kg/m³; b – 350 kg/m³

Fig. 5.9. Collapse character of composite material samples with different density, when strained by 50%:

a – 150 kg/m³; b – 350 kg/m³

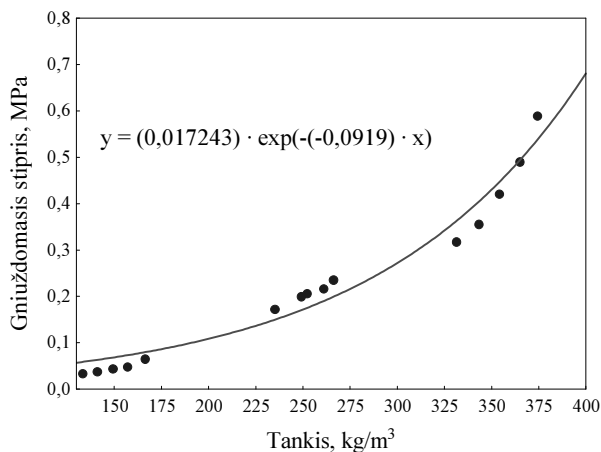
150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomasis stipris nusakomas gniuždomuoju įtapiu esant ribinei santykinei deformacijai, iki kurios pasiekimo yra išlaikoma kvazilinijinė priklausomybė ir kurią viršijus stebimas ženklus deformacijų augimas bei nukrypimas nuo linijinės priklausomybės.

Autoriai (Kozá *et al.* 2003) teigia, kad gniuždomasis stipris didėja didėjant bandinio tankiui, o mažesnio tankio bandinių stiprumo savybės pastovesnės. Ši tendencija stebima ir nustatant 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomąjį stiprį. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo stiprio tyrimo duomenų rezultatai pateikti 5.10 paveiksle.

Tyrimo duomenų analizė parodė, kad kuo didesnis yra kompozitinės medžiagos bandinių tankis (ρ_a), tuo didesnė yra jų gniuždomojo stiprio (σ_{kr}) vertė ir atvirkščiai. Sudaryta eksponentinė lygtis, išreiškianti jų tarpusavio ryšį:

$$\sigma_{kr} = (0,017243) \cdot \exp(-(-0,0919) \cdot \rho_a) \quad (5.2)$$

su kvadratinio nuokrypiu $s_e = 0,034$ MPa ir determinacijos koeficientu $R^2_{\sigma_{kr}} = 0,966$, kuris rodo, kad gniuždomojo stiprio vertės variacija vidutiniškai 97 % priklauso nuo kompozitinės medžiagos bandinio tankio.

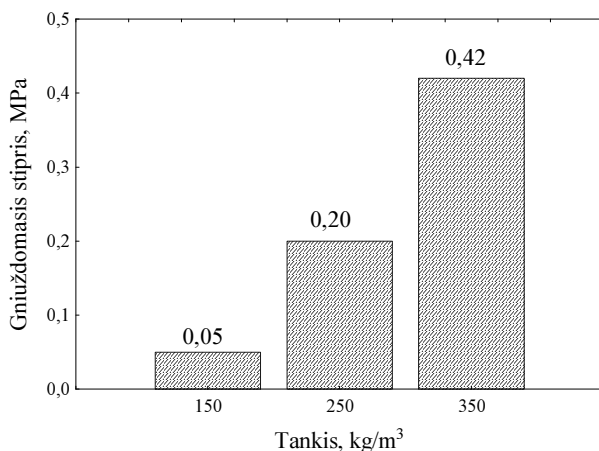


5.10 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomasis stipris
Fig. 5.10. Compressive strength of composite material samples with different density

Norint palyginti skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo stiprio rezultatus, jų vertės, pagal (2.6) formulę, buvo perskaičiuotos, pasirinkus 150, 250 ir 350 kg/m³ tankį. Tyrimo duomenų analizė pateikta 5.11 paveiksle.

Vidutinė 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo stiprio vertė (0,20 MPa) yra 300,0 % didesnė palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo stiprio verte (0,05 MPa). Vidutinė 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo stiprio vertė (0,42 MPa) yra 740,0 ir 110,0 % didesnė, palyginti atitinkamai su 150 ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo stiprio vertėmis. Iš tyrimo duomenų analizės galima spręsti, kad bandinio gniuždomąjį stiprį lemia jo tūryje esančios matricos sienelių storis (intarpų kiekis) ir tuštumų pobūdis. Neužpildytų matrica susisiekiančių tuštumų, esančių tarp intarpų (ne didesnių kaip 5,00 mm) 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose,

poveikis jų gniuždomojo stiprio sumažėjimui yra didesnis, palyginti su oro tuštumų, esančių 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių matricoje, poveikiu.



5.11 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo stiprio, perskaičiuoto esant pasirinktam tankiui, vidutinės vertės

Fig. 5.11. Average values of compressive strength of composite material samples with different density, recalculated to choosed density

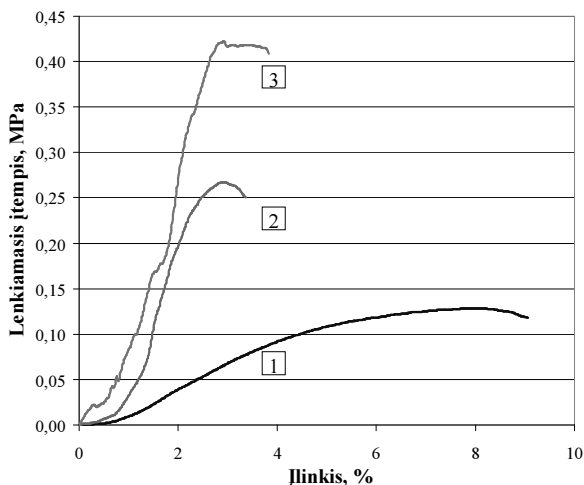
Atlikti kompozitinės medžiagos bandinių mikrostruktūros tyrimai parodė, kad mažesnio tankio bandinių matrica yra puri, o jos kietėjimo metu kai kurių susidariusių junginių išsikristalizavimo laipsnis yra mažesnis, palyginti su didesnio tankio bandinių junginių išsikristalizavimo laipsniu. Mažesnio tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomojo stiprio vertės iš dalies mažėja ir dėl šių minėtų priežasčių.

5.5. Lenkiamasis stipris

Iš lenkiamojo įtempio-įlinkio kreivės, būdingos 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniui, matyti, kad lenkiamasis įtempis didėja tolygiai ir esant 8,0 % įlinkiui pasiekia maksimalią 0,13 MPa vertę (5.12 pav. 1 kreivė). Toks tolygus įtempio didėjimas vyksta dėl plono matricos, dengiančios kompozitinės medžiagos intarpus, sluoksnio ir oro tuštumų jame nebuvimo. Minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinio tūryje esantis matricos kiekis nepajėgia

priešintis apkrovai, todėl jame, kaip ir tarpuose, vyksta tampriosios-plastinės deformacijos.

Iš lenkiamojo įtempio-įlinkio kreivės, būdingos 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniui, matyti, kad lenkiamojo įtempio pokytį galima suskirstyti į kelis etapus (5.12 pav. 2 kreivė). Pirmame etape jis didėja tolygiai, kol kompozitinės medžiagos bandinys pasiekia $0,8 \%$ įlinkį. Bandinyje vyksta tampriosios-plastinės deformacijos, nes apkrovai priešinasi tarpai, esantys išoriniame jo sluoksnyje. Antrame etape lenkiamasis įtempis didėja greičiau, nes apkrovai vietoj deformuotų tarpų priešinasi matrica. Minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinys suyra esant $2,9 \%$ įlinkiui ir $0,27 \text{ MPa}$ lenkiamojo įtempio vertei.



5.12 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo įtempio-įlinkio kreivės:

1 – 150 kg/m^3 ; 2 – 250 kg/m^3 ; 3 – 350 kg/m^3

Fig. 5.12. Stress–deflection curves of composite material samples with different density:

1 – 150 kg/m^3 ; 2 – 250 kg/m^3 ; 3 – 350 kg/m^3

Iš lenkiamojo įtempio-įlinkio kreivės, būdingos 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniui, matyti, kad lenkiamojo įtempio vertė didėja netolygiai (5.12 pav. 3 kreivė). Tai rodo, kad labiausiai apkrovai priešinasi kompozitinės medžiagos matricos sluoksniš, kuris yra pakankamai storas ir kuriame yra skirtingo skersmens oro tuštumų. Pasiekus tam tikras lenkiamojo įtempio vertes, pastebimas silpniausių (didžiausio skersmens poros) matricos

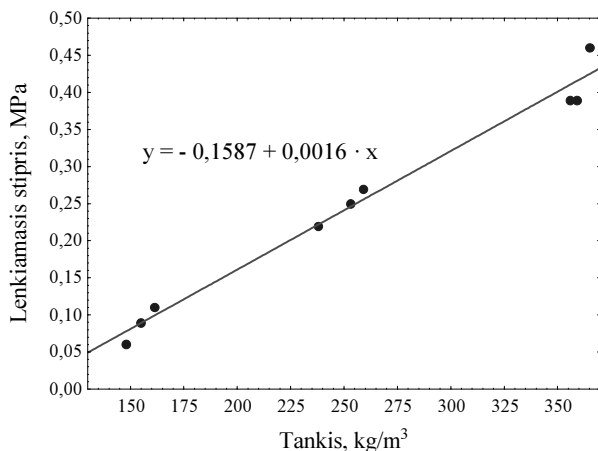
vietų irimas. Pirmasis toks reiškinys, atsirandantis apatiniuose minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinio sluoksniuose, pastebimas esant 0,24 % įlinkiui ir 0,03 MPa lenkiamojo įtempio vertei. Toliau didinant apkrovą vyksta matricos irimas viduriniuose sluoksniuose, kol suirus ir viršutiniams bandinio sluoksniams, pasiekama maksimali lenkiamojo įtempio vertė – 0,45 MPa, bandinio įlinkiui tesiekiant 2,6 %.

150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamasis stipris nusakomas didžiausiu lenkiamuoju įtapiu. Ši rodiklį, kaip ir gniuždomąjį stiprį, nulemia jo tankis, o jis priklauso nuo to, koks kiekis matricos yra bandinio tūryje.

Tyrimo duomenų analizė parodė, kad kuo didesnis yra kompozitinės medžiagos bandinių tankis, tuo didesnė yra jų lenkiamojo stiprio vertė. Pastebėta, kad mažesnio tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio vertės tap pat yra pastovesnės, palyginti su didesnio tankio bandinių lenkiamojo stiprio vertėmis. Sudaryta regresinė lygtis, išreiškianti kompozitinės medžiagos bandinio tankio (ρ_a) ir lenkiamojo stiprio (σ_b) tarpusavio ryšį:

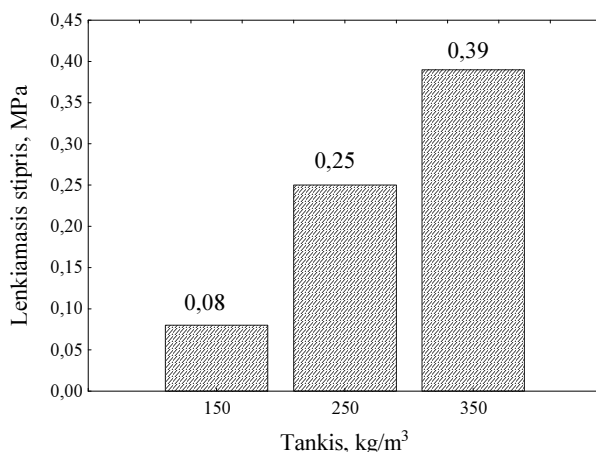
$$\sigma_b = -0,1587 + 0,0016 \cdot \rho_a \quad (5.3)$$

su kvadratinu nuokrypiu $s_e = 0,021$ MPa ir determinacijos koeficientu $R^2_{\sigma b} = 0,982$, kuris rodo, kad lenkiamojo stiprio vertės variacija vidutiniškai 98 % priklauso nuo kompozitinės medžiagos bandinio tankio. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio tyrimo duomenų rezultatai pateikti 5.13 paveiksle.



5.13 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamasis stipris
Fig. 5.13. Bending strength of composite material samples with different density

Norint palyginti skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio rezultatus, kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio rezultatai buvo perskaičiuoti pagal (2.6) formulę, esant pasirinktiems 150, 250 ir 350 kg/m³ tankiams. Vidutinė 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio vertė (0,25 MPa) yra 212,5 % didesnė, palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio vertėmis (0,08 MPa). Vidutinė 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio vertė (0,39 MPa) yra 387,5 ir 56,0 % didesnė, palyginti atitinkamai su 150 ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio vertėmis. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio tyrimo rezultatų analizė pateikta 5.14 paveiksle.



5.14 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio, perskaičiuoto, esant pasirinkam tankiui, vidutinės vertės

Fig. 5.14. Average values of bending strength of composite material samples with different density, recalculated to choosed density

Iš jos galima spręsti, kad kompozitinės medžiagos bandinio lenkiamąjį stiprį, kaip ir gniuždomąjį, lemia jo tūryje esančios matricos sienelių storis, priklausantis nuo tarpų kiekio, ir tuštumų pobūdis. Tačiau šis poveikis nėra toks ryškus, palyginti su gniuždomojo stiprio tyrimo rezultatais. Taip yra todėl, kad lenkimas nusako sukibties pobūdį tarp atskirų kompozitinės medžiagos sudedamųjų dalių. Dėl tarpų nelygaus paviršiaus tarp jų ir matricos, naudojant reikiamą kiekį APM dėl sukibties darbo, užtikrinamas geras sukibimas. Tai akivaizdžiai matoma 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose, kurių tūryje yra ypač didelis tarpų kiekis. Minėto tankio bandiniuose tarp

intarpų (ne didesnių kaip 5,00 mm) esančių matrica neužpildytų susisiekiančių tuštumų poveikis lenkiamojo stiprio sumažėjimui kompensuojamas ypač geru sukibimu tarp atskirų kompozitinės medžiagos sudedamųjų dalių. 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose tarp intarpų (mažesnių kaip 20,00 mm) esančių tuštumų nėra arba jų yra nedaug. Jų matricoje suformuotų oro tuštumų skersmuo ir lemia lenkiamojo stiprio rezultatus.

Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių lenkiamojo stiprio vertės taip pat priklauso nuo bandinių mikrostruktūros. Mažesnio tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose puri matrica ir jos kietėjimo metu kai kurių susidariusių junginių mažesnis išsikristalizavimo laipsnis lemia mažesnes lenkiamojo stiprio vertes. Didesnio tankio bandiniuose, kurių matrica yra tanki, o susidariusių junginių išsikristalizavimo laipsnis yra didesnis, lenkiamojo stiprio vertės yra didesnės.

5.6. Spūdumas

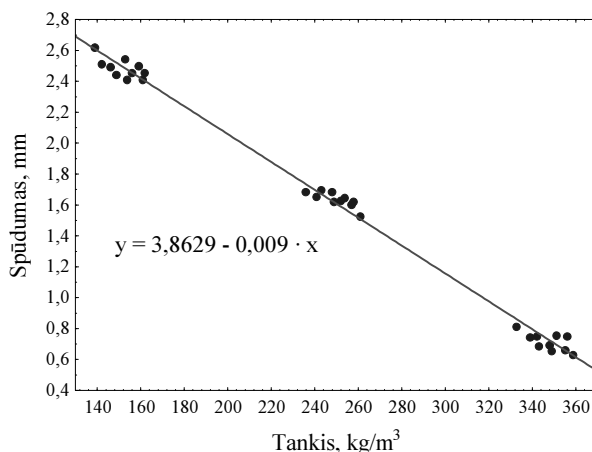
Tyrimų rezultatai rodo, kad, kaip ir buvo tikėtasi, skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių spūdumo vertė mažėja didėjant jų tankiui. 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniai po tam tikro apkrovų derinio deformavosi (2,41–2,62 mm), 250 kg/m³ – (1,60–1,69 mm), o 350 kg/m³ – (0,63–0,81 mm). Dėl didelio intarpų kiekio 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje susidaro plonos matricos sienelės. Jų storis yra nepakankamas, kad priešintųsi veikiančių apkrovų deriniui, ir leidžia nesunkiai deformuoti intarpus. Didesnio tankio bandiniuose, turinčiuose mažesni intarpų kiekį, susidaro storesnės matricos sienelės, neleidžiančios deformuoti intarpų. Sudaryta regresinė lygtis, išreiškianti kompozitinės medžiagos bandinio tankio (ρ_a) ir spūdumo (c) tarpusavio ryšį:

$$c = 3,8629 - 0,009 \cdot \rho_a \quad (5.4)$$

su kvadratinu nuokrypiu $s_e = 0,055$ mm ir determinacijos koeficientu $R^2_c = 0,994$, kuris rodo, kad spūdumo vertės variacija vidutiniškai 99 % priklauso nuo kompozitinės medžiagos bandinio tankio. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių spūdumo tyrimo duomenų rezultatai pateikti 5.15 paveiksle.

Tyrimo rezultatų analizė rodo, kad vidutinė 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių spūdumo vertė (1,63 mm) yra 52,1 % mažesnė, palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių spūdumo verte (2,48 mm). Vidutinė 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių spūdumo vertė

(0,71 mm) yra 249,3 ir 129,6 % mažesnė, palyginti atitinkamai su 150 ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių spūdumo vertėmis.



5.15 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių spūdumo vertės
Fig. 5.15. Values of thickness for floating floor of composite material samples with different density

Mažesnio tankio kompozitinės medžiagos bandinių spūdumo vertės yra didesnės taip pat ir dėl tarp intarpų esančių neužpildytų matricos tuštumų. Apkrovus bandinį, deformuojami intarpai (ne didesni kaip 5,00 mm) lengviau pasislenka į neužpildytų matrica tuštumų vietas ir taip didina viso bandinio spūdumo vertę. Kai nuo bandinio pašalinama apkrova, jo spūdumo vertė sumažėja dėl deformuotų intarpų, esančių visame jo tūryje, dalinio formos atsistatymo. Didesnio tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose esantys intarpai (mažesni kaip 20,00 mm) dėl visiškai arba iš dalies užpildytų matrica tuštumų, gali tik deformuotis, o pasislinkti negali arba gali tik iš dalies. Kai nuo 250–350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinio pašalinama apkrova, jo spūdumo vertė tik šiek tiek sumažėja dėl deformuotų intarpų, esančių išoriniuose bandinio sluoksniuose, dalinio formos atsistatymo.

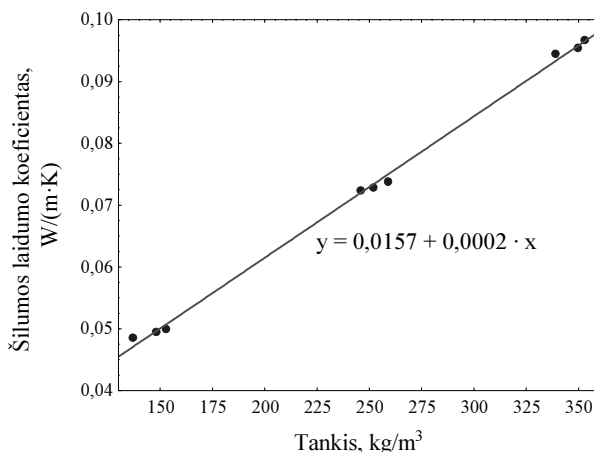
5.7. Šilumos laidumo koeficientas

Tyrimų rezultatai rodo, kad kompozitinės medžiagos bandinių, kurių tankis kito (137–353 kg/m³) ribose, šilumos laidumo koeficiento vertės atitinkamai kito (0,0485–0,0967 W/m·K) ribose. Šilumos laidumo koeficiento verčių vidutinėje

10 °C temperatūroje tyrimai rodo, kad kuo didesnis kompozitinės medžiagos bandinių tankis (ρ_a), tuo didesnė yra jų šilumos laidumo koeficiento (λ_{10}) vertė ir atvirkščiai. Sudaryta regresinė lygtis, išreiškianti jų tarpusavio ryšį:

$$\lambda_{10} = 0,0157 + 0,0002 \cdot \rho_a \quad (5.5)$$

su kvadratinio nuokrypiu $s_e = 0,009$ W/m·K ir determinacijos koeficientu $R^2_{\lambda_{10}} = 0,998$, kuris rodo, kad šilumos laidumo koeficiento vertės variacija vidutiniškai 99 % priklauso nuo kompozitinės medžiagos bandinio tankio. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių šilumos laidumo koeficiento, esant vidutinei 10 °C temperatūrai, vertės pateiktos 5.16 paveiksle.



5.16 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių šilumos laidumo koeficiento vertės

Fig. 5.16. Values of thermal conductivity coefficient of composite material samples with different density

Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių šilumos laidumo koeficiento vertė priklauso nuo jų struktūros. Kai bandinių tūryje yra mažesnis tarpų kiekis, juos dengia storesnis matricos sluoksnis. Kadangi matricos šilumos laidumo koeficientas yra didesnis, palyginti su tarpų iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų šilumos laidumo koeficientu, susidaro didesni ir viso bandinio šilumos nuostoliai ir atvirkščiai. Tyrimo rezultatų analizė rodo, kad vidutinė 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių šilumos laidumo koeficiento vertė (0,0730 W/m·K) yra 48,1 % didesnė, palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių šilumos laidumo koeficiento verte (0,0493 W/m·K). Vidutinė 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių

šilumos laidumo koeficiento vertė ($0,0955 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) yra 93,8 ir 30,9 % didesnė, palyginti atitinkamai su 150 ir 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių šilumos laidumo koeficiento vertėmis.

Mikrostruktūros tyrimai rodo, kad mažesnio tankio kompozitinės medžiagos bandinių matrica yra puri, o didesnio – tanki. Puri matrica atitinkamai lemia mažesnę viso kompozitinės medžiagos bandinio šilumos laidumo koeficientą, o tanki – didesnę.

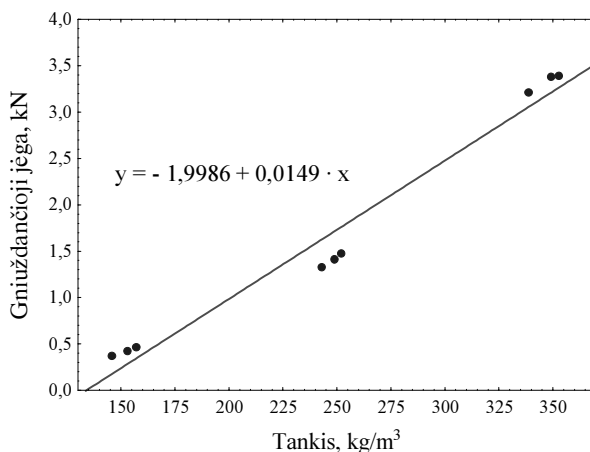
5.8. Sutelktosios apkrovos poveikis

Sutelktosios apkrovos poveikį nusako gniuždančioji jėga (F_p), esanti jėgos-deformacijos kreivės kritiniame taške. Sutelktosios apkrovos poveikio skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandiniams tyrimų rezultatai rodo, kad gniuždančioji jėga (F_p) didėja, didėjant jų tankiui (ρ_a). Sudaryta regresinė lygtis, išreiškianti kompozitinės medžiagos bandinio tankio ir gniuždančiosios jėgos tarpusavio ryšį:

$$F_p = -1,9986 + 0,0149 \cdot \rho_a \quad (5.6)$$

su kvadratinio nuokrypiu $s_e = 0,241 \text{ kN}$ ir determinacijos koeficientu $R^2_{Fp} = 0,969$, kuris rodo, kad gniuždančiosios jėgos vertės variacija vidutiniškai 96 % priklauso nuo kompozitinės medžiagos bandinio tankio. Naudojant sutelktąją apkrovą gniuždančiosios jėgos vertė, tiriant 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinius, kito ($0,368\text{--}0,468 \text{ kN}$), 250 kg/m^3 – ($1,322\text{--}1,472 \text{ kN}$), o 350 kg/m^3 – ($3,211\text{--}3,392 \text{ kN}$) ribose. Sutelktosios apkrovos poveikio skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandiniams tyrimo duomenų rezultatai pateikti 5.17 paveiksle.

Tyrimo rezultatų analizė rodo, kad vidutinė 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždančiosios jėgos vertė ($1,402 \text{ kN}$) yra 233,8 % didesnė, palyginti su 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždančiosios jėgos verte ($0,420 \text{ kN}$). Vidutinė 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždančiosios jėgos vertė ($3,326 \text{ kN}$) yra 691,9 ir 137,2 % didesnė, palyginti atitinkamai su 150 ir 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždančiosios jėgos vertėmis. 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje esantis didesnis kiekis tarpų (ne didesnių kaip $5,00 \text{ mm}$) lemia plonesnes matricos sienes ir neužpildytas matrica oro tuštumas, esančias tarp minėtų tarpų. Tokių bandinių tūryje esantis matricos kiekis yra mažas, todėl ji nepajėgia priešintis sutelktajai apkrovai, o tarpai dėl gero sąlyčio su matrica ir priešinasi tokio pobūdžio apkrovai.



5.17 pav. Sutelktosios apkrovos poveikis skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandiniams

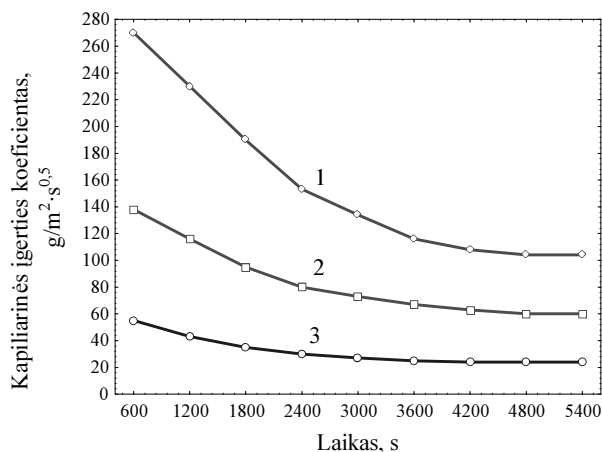
Fig. 5.17. Influence of point load on composite material samples with different density

250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje yra mažesnis kiekis tarpų (mažesnių kaip 20,00 mm), todėl tarp jų susidaro storesnis matricos sienelių sluoksnis, kuris geba priešintis sutelktosios apkrovos poveikiui. Jis taip pat geriau užpildo tarp tarpų esančias tuštumas, todėl susisiekiančių tuštumų kiekis yra žymiai mažesnis, palyginti su 150 kg/m³ tankio bandinių tuštumų kiekiu. Minėto tankio bandinius silpnina ir su APM matricoje suformuotos skirtingo skersmens oro tuštumos.

350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje tarp tarpų (taip pat mažesnių kaip 20,00 mm) susidariusios oro tuštumos yra visiškai užpildytos matricos, todėl sutelktosios apkrovos poveikis yra ne toks ryškus, palyginti su mažesnio tankio kompozitinės medžiagos bandinių apkrovos poveikiu. Minėto tankio bandinius taip pat silpnina tik su APM matricoje suformuotos skirtingo skersmens oro tuštumos.

5.9. Kapiliarinės įgerties koeficientas

Tyrimų rezultatai rodo, kad 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniai intensyviausiai absorbuoja vandenį savo tūryje per pirmąsias 30 eksperimento minučių. Vėliau šis procesas lėtėja ir vyksta tolygiau iki eksperimento pabaigos (5.18 pav.).



5.18 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių kapiliarinės įgerties koeficiento vidutinės vertės:

1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Fig. 5.18. Average values of absorption coefficient due to capillary action of composite material samples with different density:

1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių poveikis kapiliarinės įgerties koeficiento vertei yra skirtingas. Dėl kompozitinės medžiagos tarpų hidrofobiškumo absorbcijos procesas vyksta tik tuštumose, esančiose tarp intarpų, ir matricoje. Mažesnio tankio bandinių tūryje tarp intarpų (ne didesnių kaip 5,00 mm) esantis didesnis neužpildytų matrica susisiekiančių tuštumų kiekis lemia dideles kapiliarinės įgerties koeficiento vertes. Kaip jau buvo minėta anksčiau, didesnio tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje yra mažesnis kiekis intarpų (mažesnių kaip 20,00 mm), todėl tarp jų susidaro storesnės matricos sienelės. Jos visiškai arba iš dalies užpildo tuštumas, esančias tarp minėto dydžio intarpų, o jose suformuotų tuštumų skersmuo ir kiekis taip pat lemia absorbcijos proceso greitį bandinio tūryje.

Tyrimų rezultatai rodo, kad 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinė kapiliarinės įgerties koeficiento vertė yra didžiausia. Pagal standarto reikalavimus nustatytos vidutinės minėto koeficiento vertės po 600, 1800 ir 5400 s buvo atitinkamai 269,6, 180,1 ir 104,3 g/m²·s^{0,5} (5.18 pav. 1 kreivė).

Eksperimentais nustatyta, kad 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinės kapiliarinės įgerties koeficiento vertės po 600, 1800 ir 5400 s buvo atitinkamai 137,7, 94,9 ir 59,6 g/m²·s^{0,5} (5.18 pav. 2 kreivė). Šios vertės

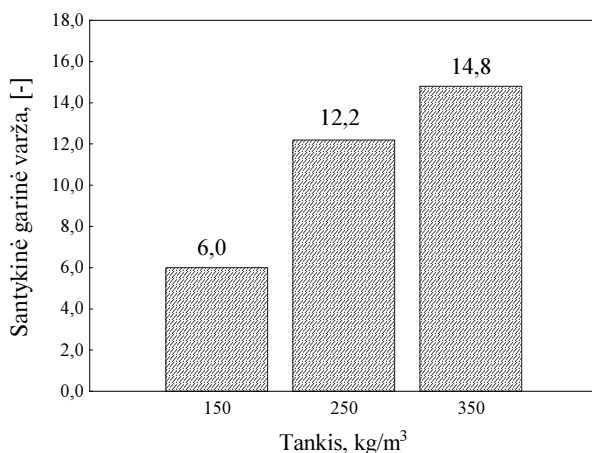
yra 95,8, 89,8 ir 75,0 % mažesnės, palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinėmis kapiliarinės įgerties koeficiento vertėmis.

Tyrimų rezultatai rodo, kad 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinės kapiliarinės įgerties koeficiento vertės po 600, 1800 ir 5400 s buvo atitinkamai 55,1, 35,2 ir 24,2 g/m²·s^{0,5} (5.18 pav. 3 kreivė). Šios vertės yra 389,3, 411,7 ir 331,0 % mažesnės, palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vertėmis, ir 149,9, 169,6 ir 146,3 % mažesnės, palyginti su 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vertėmis.

Tyrimo rezultatų analizė rodo, kad skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinė kapiliarinės įgerties koeficiento vertė labiau priklauso nuo tarp intarpų esančių neužpildytų matrica susisiekiančių tuštumų kiekio, nei nuo matricos kiekio. Taip yra todėl, kad 150 kg/m³ tankio bandiniai dėl didelio susisiekiančių tuštumų, esančių tarp intarpų, kiekio absorbuoja vandenį visame savo tūryje. 250 kg/m³ tankio bandiniuose minėtų tuštumų kiekis jų tūryje yra žymiai mažesnis. Vandens absorbcija iš dalies vyksta tiek bandinio tūryje per tarp intarpų esančias susisiekiančias tuštumas, tiek paviršiniuose jo sluoksniuose per matricoje suformuotas tuštumas. 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose vandens absorbcija vyksta tik paviršiniuose jų sluoksniuose per matricoje suformuotas oro tuštumas.

5.10. Laidumas vandens garams

Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių laidumo vandens garams savybių tyrimai rodo, kad visos jos priklauso nuo intarpų kiekio bandinio tūryje. Tai galima paaiškinti skirtingo tankio bandinių struktūros skirtumu – matricos pertvarėlių, dengiančių intarpus iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų, storiu ir oro tuštumų, esančių tose pertvarėlėse ir tarp intarpų esančių neužpildytų matrica tuštumų kiekiu. 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose tarp intarpų (ne didesnių kaip 5,00 mm) esančių susisiekiančių tuštumų kiekis yra didelis, o matricos kiekis ir jos sienelių storis tarp intarpų – maži. Todėl tokios struktūros medžiagos pasipriešinimas vandens garams yra mažas, o savitojo vandens garų pralaidumo vertė yra didelė. 250–350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose tarp intarpų (mažesnių kaip 20,00 mm) esančių neužpildytų matrica susisiekiančių tuštumų yra mažai arba jų iš viso nėra, o matricos kiekis ir jos sienelių storis tarp minėtų intarpų – didesni. Todėl tokio tankio bandinių pasipriešinimas vandens garams yra didelis, o savitojo vandens garų pralaidumo vertė – maža. Eksperimento metu nustatytos skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinės laidumo vandens garams savybių vertės pateiktos 5.19 ir 5.20 paveiksluose. ir 5.1 lentelėje.



5.19 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinės santykinės garinės varžos vertės:

1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Fig. 5.19. Average values of relative vapour resistance of composite material samples with different density:

1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

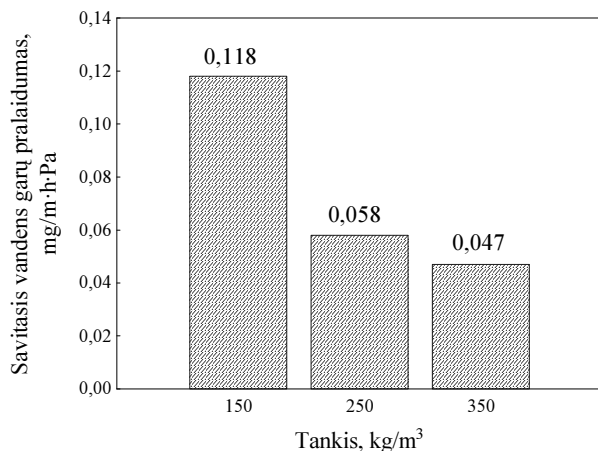
5.1 lentelė. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinės laidumo vandens garams savybių vertės

Table 5.1. Average values of water vapour transmission properties of composite material samples with different density

Tankis ρ , kg/m³	Ekvivalentinis pagal difuziją oro sluoksnio storis S , m	Vandens garų srauto tankis g , mg/m²·h	Vandens garų pernašos koeficientas W , mg/m²·hPa	Garinė varža Z , m²h·Pa/mg
150	0,30	2870	2,4	0,42
250	0,62	1386	1,1	0,87
350	0,76	1126	0,9	1,07

Tyrimų rezultatai rodo, kad 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinė santykinės garinės varžos vertė yra mažiausia, palyginti su 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinėmis santykinės garinės varžos vertėmis, ir yra lygi 6,0. 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinė santykinės garinės varžos vertė yra 12,2. Tai yra 103,3 % daugiau, palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutine santykinės garinės varžos verte. Didžiausia

vidutinė santykinės garinės varžos vertė nustatyta 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose. Ji lygi 14,8 ir yra 146,7 % ir 21,3 % didesnė, palyginti atitinkamai su 150 ir 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinėmis santykinės garinės varžos vertėmis.



5.20 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinės savitojo vandens garų pralaidumo vertės

Fig. 5.20. Average values of specific water vapour permeability of composite material samples with different density

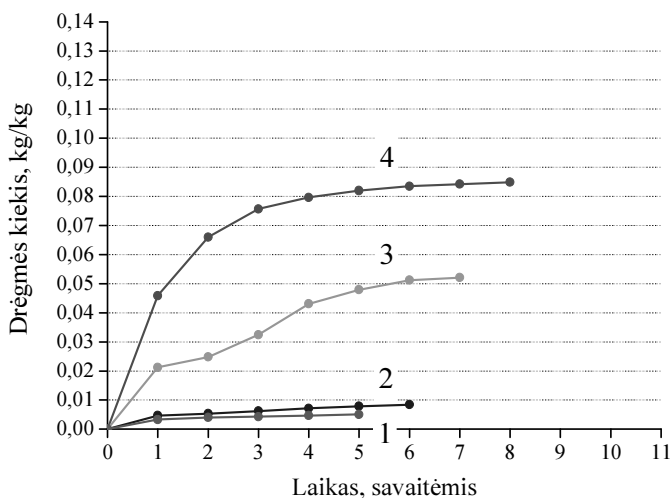
Vidutinės savitojo vandens garų pralaidumo vertės, priešingai negu santykinės garinės varžos, mažėja, didėjant kompozitinės medžiagos bandinių tankiui (5.20 pav.). Didžiausia vidutinė savitojo vandens garų pralaidumo vertė nustatyta 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose ir yra lygi $0,118 \text{ mg/m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$. 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose minėto rodiklio vidutinė vertė buvo $0,058 \text{ mg/m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$, o tai yra 103,5 % mažiau, palyginti su 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinėmis savitojo vandens garų pralaidumo vertėmis. Mažiausia vidutinė savitojo vandens garų pralaidumo vertė nustatyta 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose ir yra lygi $0,047 \text{ mg/m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$. Tai yra 151,1 % ir 23,4 % mažiau, palyginti atitinkamai su 150 ir 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinėmis savitojo vandens garų pralaidumo vertėmis.

Laidumo vandens garams savybių tyrimai rodo, kad pastatų atitvarų konstrukcijose naudojant 150 kg/m^3 tankio kompozitinę medžiagą galima gauti laidžią garams sieną, t. y. patalpose susidarę vandens garai gali laisvai migruoti į išorę. 250 ir 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių vandens garų

laidumo rezultatai blogesni, tačiau juos galima koreguoti, atitinkamai mažinant minėtų tankių kompozitinės medžiagos sluoksnio storį pastatų atitvarų konstrukcijose. Tai vertingi tyrimų duomenys, kurie yra labai reikalingi projektuotojams, skaičiuojantiems pastatų atitvarų konstrukcijas.

5.11. Higroskopinė sorbcija

Sorbcija gali vykti bandinio paviršiniuose sluoksniuose arba visame tūryje. Pirmuoju atveju vykstantis procesas vadinamas adsorbcija, antruoju – absorbcija. Porėtų, mažo tankio medžiagų paviršiuje iš pradžių vyksta adsorbcijos procesas, kuris po tam tikro laiko ir išotinio laipsnio pereina į absorbciją, vykstančią visame jų tūryje. Higroskopinės sorbcijos eksperimentas vykdomas tol, kol pasiekama pastovi bandinių masė. 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių higroskopinės sorbcijos savybių tyrimų rezultatai pateikti 5.21 paveiksle.

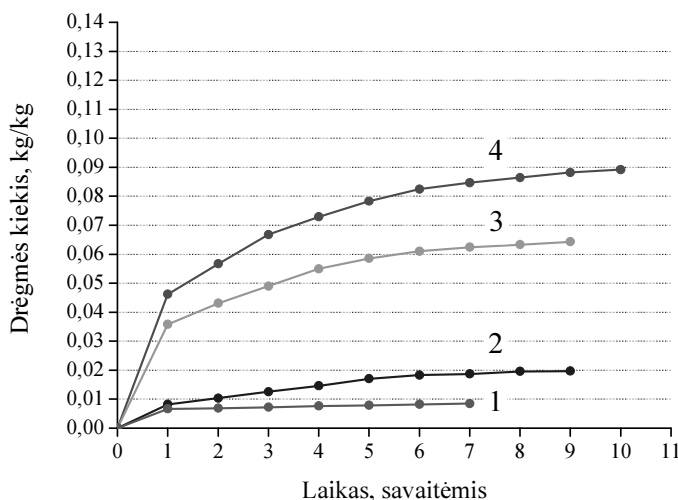


5.21 pav. Vidutinis drėgmės kiekis 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose, kai santykinis aplinkos drėgnis yra:
1 – 43,2 %; 2 – 58,2 %; 3 – 81,1 %; 4 – 94,0 %

Fig. 5.21. Average moisture content in composite material samples with density of 150 kg/m^3 , when ambient relative humidity is:
1 – 43.2%; 2 – 58.2%; 3 – 81.1%; 4 – 94.0%

Tyrimų rezultatai rodo, kad, esant 94,0 % santykiniam aplinkos drėgniui, 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje absorbuotas didžiausias vidutinis drėgmės kiekis yra 0,0849 kg/kg (5.21 pav. 4 kreivė). Šis drėgmės kiekis gaunamas praėjus 8 savaitėms nuo eksperimento pradžios. Kai santykinis aplinkos drėgnis yra 81,1 ir 58,2 %, nuo eksperimento pradžios praėjus atitinkamai 7 ir 6 savaitėms, kompozitinės medžiagos bandinių tūryje absorbuotas vidutinis drėgmės kiekis buvo atitinkamai 0,0521 ir 0,0084 kg/kg (5.21 pav. 3 ir 2 kreivės). Nustatyta, kad mažiausias vidutinis drėgmės kiekis – 0,0051 kg/kg, absorbuotas minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje, praėjus nuo eksperimento pradžios 5 savaitėms, esant 43,2 % santykiniam aplinkos drėgniui (5.21 pav. 1 kreivė).

250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių higroskopinės sorbcijos savybių tyrimų rezultatai pateikti 5.22 paveiksle.



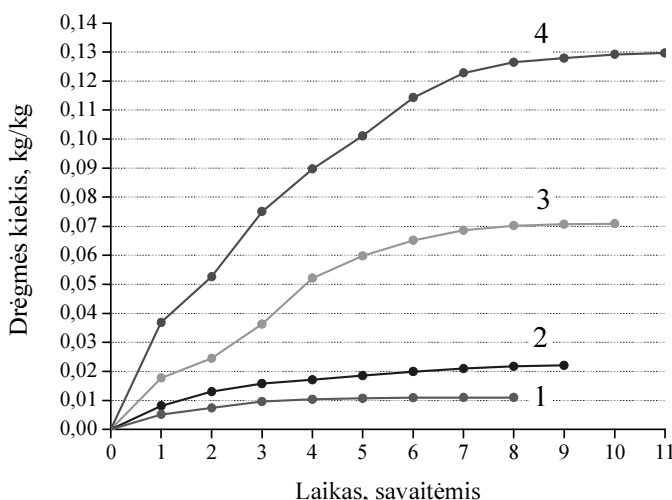
5.22 pav. Vidutinis drėgmės kiekis 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose, kai santykinis aplinkos drėgnis yra:
1 – 43,2 %; 2 – 58,2 %; 3 – 81,1 %; 4 – 94,0 %

Fig. 5.22. Average moisture content in composite material samples with density of 250 kg/m³, when ambient relative humidity is:
1 – 43.2%; 2 – 58.2%; 3 – 81.1%; 4 – 94.0%

Tyrimų rezultatai rodo, kad 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje absorbuotas drėgmės kiekis yra didesnis, palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių drėgmės kiekiu. Didžiausias drėgmės kiekis – 0,0892 kg/kg, absorbuotas minėto tankio bandinių tūryje taip pat esant

94,0 % santykiniam aplinkos drėgmeniui, praėjus nuo eksperimento pradžios 10 savaičių (5.22 pav. 4 kreivė). Šis drėgmės kiekis yra 5,1 % didesnis, palyginti su 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių drėgmės kiekiu. Kai santykinis aplinkos drėgnis yra 81,1 % ir 58,2 %, nuo eksperimento pradžios praėjus 9 savaitėms, vidutinis absorbuotas drėgmės kiekis kompozitinės medžiagos bandinių tūryje buvo atitinkamai 0,0643 ir 0,0197 kg/kg (5.22 pav. 3 ir 2 kreivės). Tai yra atitinkamai 23,4 % ir 134,5 % daugiau, palyginti su 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių drėgmės kiekiu. Nustatyta, kad mažiausias vidutinis drėgmės kiekis – 0,0084 kg/kg, absorbuotas minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje, praėjus nuo eksperimento pradžios 7 savaitėms, kai aplinkos santykinis drėgnis taip pat yra 43,2 % (5.22 pav. 1 kreivė). Tai yra 64,7 % daugiau, palyginti su 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių drėgmės kiekiu.

350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių higroskopinės sorbcijos savybių tyrimų rezultatai pateikti 5.23 paveiksle.



5.23 pav. Vidutinis drėgmės kiekis 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose, kai santykinis aplinkos drėgnis yra:

1 – 43,2 %; 2 – 58,2 %; 3 – 81,1 %; 4 – 94,0 %

Fig. 5.23. Average moisture content in composite material samples with density of 350 kg/m^3 , when ambient relative humidity is:

1 – 43.2%; 2 – 58.2%; 3 – 81.1%; 4 – 94.0%

Tyrimų rezultatai rodo, kad 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje absorbuotas vidutinis drėgmės kiekis yra didžiausias, palyginti

su kito tankio kompozitinės medžiagos bandinių drėgmės kiekiu. Didžiausias vidutinis drėgmės kiekis – 0,1297 kg/kg, absorbuotas minėto tankio bandinių tūryje esant 94,0 % santykiniam aplinkos drėgniui, praėjus nuo eksperimento pradžios 11 savaičių (5.23 pav. 4 kreivė). Šis drėgmės kiekis yra 52,8 % didesnis, palyginti su 150 kg/m³, ir 45,4 % didesnis, palyginti su 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių drėgmės kiekiu. Kai santykinis aplinkos drėgnis yra 81,1, praėjus nuo eksperimento pradžios 10 savaičių, vidutinis drėgmės kiekis kompozitinės medžiagos bandinių tūryje buvo 0,0709 kg/kg (5.23 pav. 3 kreivė). Tai yra 36,1 % ir 10,3 % daugiau, palyginti su 150 kg/m³ ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių drėgmės kiekiu. Kai santykinis aplinkos drėgnis yra 58,2 %, vidutinis absorbuotas drėgmės kiekis minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje buvo 0,0220 kg/kg, nuo eksperimento pradžios praėjus 9 savaitėms (5.23 pav. 2 kreivė). Tai yra 161,9 % ir 11,7 % daugiau, palyginti su 150 kg/m³ ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių drėgmės kiekiu. Nustatyta, kad mažiausias vidutinis drėgmės kiekis, lygus 0,0110 kg/kg, absorbuotas minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių tūryje, nuo eksperimento pradžios praėjus 8 savaitėms, kai aplinkos santykinis drėgnis yra 43,2 % (5.23 pav. 1 kreivė). Tai yra 115,7 % ir 31,0 % daugiau, palyginti su 150 kg/m³ ir 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių drėgmės kiekiu.

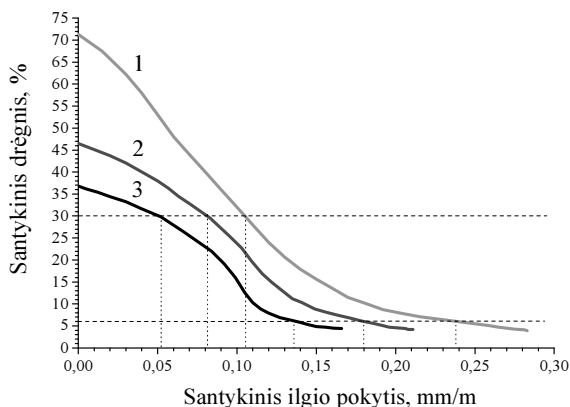
Atlikta higroskopinės sorbcijos rezultatų analizė rodo, kad vidutinis drėgmės kiekis kompozitinės medžiagos bandiniuose priklauso nuo jų tankio ir santykinio aplinkos drėgnio. Kuo mažesni yra bandinio tankis ir santykinis aplinkos drėgnis, tuo mažesnis drėgmės kiekis bus absorbuotas kompozitinės medžiagos bandinio tūryje. Ir atvirkščiai, didesnę drėgmės kiekį absorbuoja didesnio tankio kompozitinės medžiagos bandiniai. Taip yra todėl, kad tarpai iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų yra hidrofobiniai, o sorbcijos procese dalyvauja tik kompozitinės medžiagos matrica. Kuo jos kiekis kompozitinės medžiagos bandinio tūryje yra didesnis, tuo didesnis drėgmės kiekis ir bus absorbuojamas.

Sorbcijos greitis taip pat priklauso nuo santykinio aplinkos drėgnio ir kompozitinės medžiagos bandinio struktūros. Matricos neužpildytos susisiekiančios tuštumos, esančios tarp tarpų (ne didesnių kaip 5,00 mm) mažesnio tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose, leidžia sorbcijos procesui vykti gilesniuose sluoksniuose. Šis procesas vyksta greičiau esant didesniam santykiniam aplinkos drėgniui. Didesnio tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose dėl jų tūryje esančių storesnių matricos sienelių ir susisiekiančių tuštumų tarp tarpų (mažesnių kaip 20,00 mm) mažo kiekio arba jų nebuvimo sorbcijos procesas pradžioje vyksta tik matricoje, esančioje paviršiniuose bandinio sluoksniuose. Sorbcijos procesas gilesniuose

kompozitinės medžiagos bandinio sluoksniuose esančiose tarp intarpų matricos sienelėse prasideda tik po tam tikro laiko.

5.12. Džiūstamasis susitraukimas

Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių džiūstamojo susitraukimo vertės nustatytos pagal bandinių santykinį ilgio pokytį, jų santykiniam drėgmeniui kintant 30–6 % ribose. Tyrimų rezultatai rodo, kad kompozitinės medžiagos bandinio tūryje esantis intarpų kiekis ir tuštumų pobūdis lemia jo džiūstamąjį susitraukimą. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių santykinio drėgnio poveikis jų vidutinei santykinio ilgio pokyčio vertei pateiktas 5.24 paveiksle.



5.24 pav. Kompozitinės medžiagos bandinio santykinio drėgnio poveikis jo vidutinei santykinio ilgio pokyčio vertei, kai bandinio tankis yra:

1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Fig. 5.24. Influence of mass related moisture content in composite material sample on the average value of its relative length change, when sample with density of:

1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Tyrimo rezultatai rodo, kad eksperimento pradžioje vidutinis 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių santykinis drėgnis yra didžiausias (71,3 %). Drėgmė kaupiasi esančiose tarp intarpų susisiekančiose ir neužpildytose matrica tuštumose. Dėl didelio intarpų kiekio bandinio tūryje juos dengiančios matricos sienelės yra labai plonos, jose nėra didesnio skersmens oro tuštumų. Matricoje kaupiasi tik nedidelis drėgmės kiekis, palyginti su kiekiu, esančiu visame kompozitinės medžiagos bandinio tūryje. Bandiniai

džiūdami traukiasi dėl drėgmės migracijos iš minėtų tuštumų. Pasiekus 30,0 % santykinį drėgnį, vidutinė bandinių santykinio ilgio pokyčio vertė yra 0,105 mm/m. Toliau džiūnant bandiniamas iki 6,0 % santykinio drėgnio, gauta vidutinė bandinių santykinio ilgio pokyčio vertė – 0,237 mm/m. Minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinė standartinė džiūstamojo susitraukimo vertė, jų santykiniam drėgniui kintant 30–6 % ribose, yra 0,132 mm/m, o vidutinė suminė džiūstamojo susitraukimo vertė, pasiekus 3,9 % santykinį drėgnį, – 0,283 mm/m (5.24 pav. 1 kreivė).

Tyrimo rezultatai rodo, kad eksperimento pradžioje vidutinis 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių santykinis drėgnis yra 46,5 %. Jis yra mažesnis, palyginti su 150 kg/m^3 tankio bandinių santykinio drėgniui, nes drėgmė labiau kaupiasi matricoje suformuotose oro tuštumose, o ne susisiekiančiose ir neužpildytose matrica tuštumose, esančiose tarp intarpų. Bandiniai džiūdami traukiasi dėl matricos traukimosi, migruojant drėgmei iš joje esančių tuštumų. Pasiekus 30 % santykinį drėgnį, vidutinė bandinių santykinio ilgio pokyčio vertė yra 0,082 mm/m. Toliau džiūstant bandiniamas iki 6,0 % santykinio drėgnio, gauta vidutinė bandinių santykinio ilgio pokyčio vertė – 0,180 mm/m. Minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinė standartinė džiūstamojo susitraukimo vertė, jų santykiniam drėgniui kintant 30–6 % ribose, yra 0,098 mm/m, o vidutinė suminė džiūstamojo susitraukimo vertė, pasiekus 4,2 % santykinį drėgnį, yra 0,211 mm/m (5.24 pav. 2 kreivė).

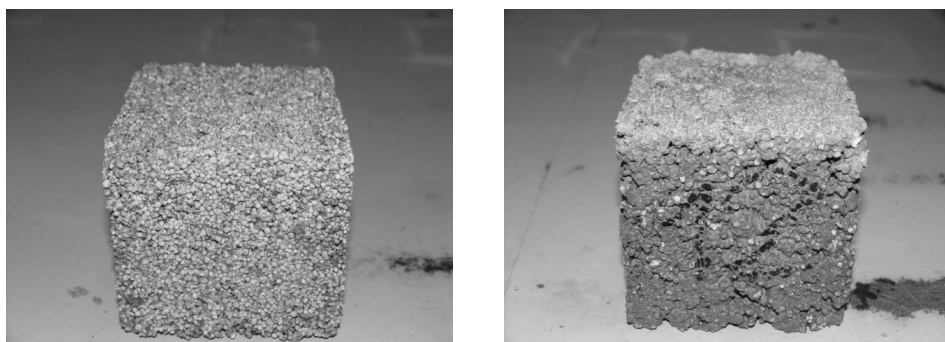
Tyrimo rezultatai rodo, kad eksperimento pradžioje vidutinis 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių santykinis drėgnis yra 36,8 %. Jis yra mažesnis, palyginti su 250 kg/m^3 tankio bandiniais, nes drėgmė kaupiasi matricoje suformuotose oro tuštumose. Drėgnio migracija iš matricoje suformuotų tuštumų lemia ir bandinių traukimąsi. Pasiekus 30 % santykinį drėgnį, vidutinė bandinių santykinio ilgio pokyčio vertė yra 0,052 mm/m. Toliau džiūstant bandiniamas iki 6,0 % santykinio drėgnio, gauta vidutinė bandinių santykinio ilgio pokyčio vertė – 0,136 mm/m. Minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinė standartinė džiūstamojo susitraukimo vertė, jų santykiniam drėgniui kintant 30–6 % ribose, yra 0,084 mm/m, o vidutinė suminė džiūstamojo susitraukimo vertė, pasiekus 4,4 % santykinį drėgnį, yra 0,166 mm/m (5.24 pav. 3 kreivė).

5.13. Atsparumas šalčiui

Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių atsparumas šalčiui nustatytas tūrinio šaldymo-atšildymo būdu. Kompozitinės medžiagos bandinių atsparumą šalčiui nusako šaldomų bandinių masės nuostoliai ir jų gniuždomojo

stiprio pokytis. Jie lyginami su kontrolinių bandinių, kurie nešaldomi, masės nuostoliais ir stiprio pokyčiu.

Šaldomų skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių išorinio vaizdo analizė rodo, kad po 35 šaldymo-atšildymo ciklų akivaizdžių bandinių irimo požymių nepastebėta. 150 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių po 35 šaldymo-atšildymo ciklų bendrasis vaizdas pateiktas 5.25 paveiksle.



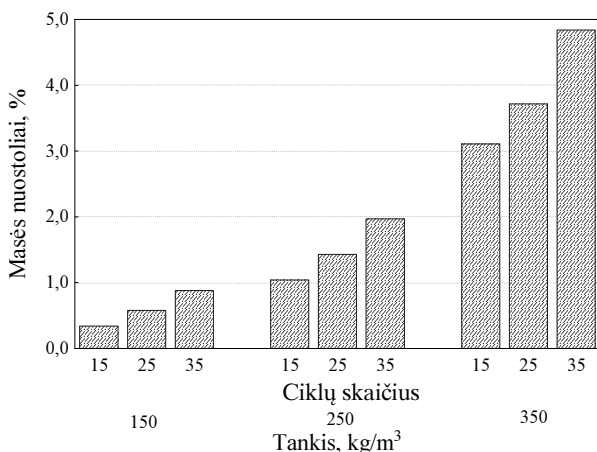
5.25 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių bendrasis vaizdas po 35 šaldymo-atšildymo ciklų:
a – 150 kg/m³; b – 350 kg/m³

Fig. 5.25. General view of composite material samples with different density after 35 cycles of freeze-thaw:
a – 150 kg/m³; b – 350 kg/m³

Tyrimo rezultatai rodo, kad, didėjant kompozitinės medžiagos bandinių tankiui ir šaldymo-atšildymo ciklų skaičiui, šaldomų bandinių masės nuostoliai didėja. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių masės nuostoliai po minėto šaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus pateikti 5.26 paveiksle.

Dėl tarp interpų (ne didesnių kaip 5,00 mm) esančių neužpildytų matrica susisiekiančių tuštumų 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių santykinis drėgnis yra didžiausias – 71,0 %. Tačiau tokia jų struktūra lemia greitą vandens drenažą iš minėto tankio bandinių. Intarpus dengiančiose plonose matricos sienelėse oro tuštumų nebuvimas taip pat lemia, kad joje bus tik nedidelis kiekis vandens. Šaldymo metu bandinio tūryje susidaro tik minimalus kiekis ledo kristalų, kurie negali efektyviai ardyti minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių struktūros, todėl jų masės nuostoliai po skirtingo ciklų skaičiaus nesiekia net 1,0 %. Šaldomų 150 kg/m³ tankio kompozitinės

medžiagos bandinių masės nuostoliai po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų sudarė atitinkamai 0,3, 0,5 ir 0,9 %.



5.26 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių masės nuostoliai po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų

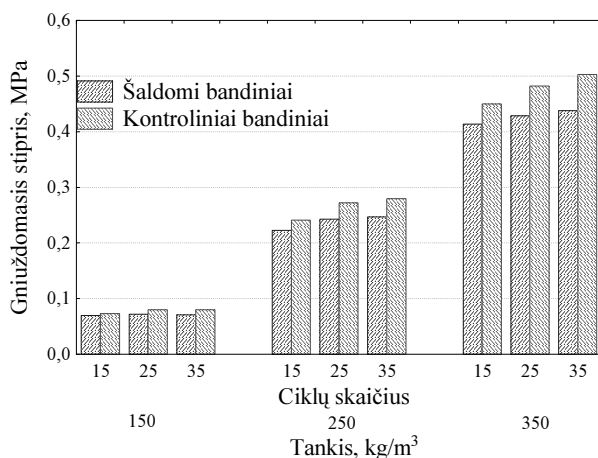
Fig. 5.26. Average values of mass loss of composite material samples with different density after 15, 25 and 35 cycles of freeze-thaw

250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių santykinis drėgnis yra mažesnis – 46,0 %. Tai lemia nedidelis kiekis neužpildytų matrica susisiekiančių tuštumų, esančių tarp intarpų (mažesnių kaip 20,00 mm). Minėto tankio bandinių įgerties procesas vyksta dėl kompozitinės medžiagos matricoje, naudojant APM, suformuotų skirtingo skersmens oro tuštumų. Po minėto proceso matricoje esantis vanduo iš jos nedrenuoja arba drenuoja iš dalies, todėl šaldymo metu šiose oro tuštumose susidaręs ledas efektyviau ardo bandinio struktūrą, palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniais. Šaldomų 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių masės nuostoliai po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų sudarė atitinkamai 1,0, 1,4 ir 2,0 %.

350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinių santykinis drėgnis yra mažiausias – 37,0 %. Jų tūryje taip pat yra mažiausias intarpų kiekis, palyginti su 150 kg/m³ ar 250 kg/m³ tankio bandiniais. Dėl to matricos sienelių, esančių tarp intarpų (taip pat mažesnių kaip 20,00 mm), storis yra pakankamas, kad visiškai užpildytų tarp jų esančias tuštumas. Šiose sienelėse yra dar daugiau skirtingo skersmens oro tuštumų, palyginti su 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniais, o bandinio įgerties procesas vyksta taip pat dėl jų. Šaldymo metu matricos sienelėse esančiose oro tuštumose susidaręs ledas dar

efektyviau ardo minėto tankio bandinių struktūrą. Šaldomų 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių masės nuostoliai po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų sudarė atitinkamai 3,1, 3,7 ir 4,8 %.

Tyrimo rezultatai rodo, kad didėjant šaldymo-atšildymo ciklų skaičiui, šaldomų bandinių gniuždomasis stipris mažėja, palyginti su kontroliniais bandiniais. Taip pat pastebėta, kad šaldomų ir kontrolinių skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių gniuždomasis stipris didėja. Ši tendencija labiau pastebima didesnio tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose, kurių tūryje yra didesnis matricos kiekis. Tai paaiškinama kompozitinės medžiagos matricoje vykstančiais cemento hidratacijos ir junginių kontrakcijos procesais. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinės gniuždomojo stiprio vertės, nustatytos po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų, pateiktos 5.27 paveiksle.



5.27 pav. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių vidutinės gniuždomojo stiprio vertės po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų

Fig. 5.27. Average values of compressive strength of composite material samples with different density after 15, 25 and 35 cycles of freeze-thaw

Tyrimo rezultatų analizė rodo, kad, lyginant 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos šaldomus ir kontrolinius bandinius po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų, matomas atitinkamai 4,3, 11,1 ir 12,7 % šaldytų bandinių vidutinių gniuždomojo stiprio verčių sumažėjimas. Kaip jau buvo minėta anksčiau, tarp intarpų (ne didesnių kaip 5,00 mm) esančios neužpildytos matrica susisiekiančios tuštumos lemia greitą vandens drenažą iš prisotintų bandinių, o didesnio skersmens oro tuštumų nebuvimas plonose matricos sienelėse taip pat

lemia, kad joje bus tik nedidelis kiekis vandens. Šaldymo metu matricoje ir tuštumose tarp intarpų nedidelis šio vandens kiekis sudaro ledo kristalus, kurie efektyviau ardo minėto tankio kompozitinės medžiagos bandinių struktūrą ir mažina jų gniuždomąjį stiprį tik po 25 ir daugiau šaldymo-atšildymo ciklų.

Tyrimo rezultatų analizė rodo, kad, lyginant 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos šaldomus ir kontrolinius bandinius po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų, matomas atitinkamai 8,1, 11,9 ir 13,4 % šaldytų bandinių vidutinių gniuždomojo stiprio verčių sumažėjimas. Hidrofobinių intarpų kiekis minėto tankio bandinių tūryje yra mažesnis, todėl matricos sienelių storis yra didesnis. Dėl jose suformuotų didesnio skersmens oro tuštumų ir vyksta įgertis. Tarp intarpų (mažesnių kaip 20,00 mm) esančių neužpildytų matrica susisiekiančių tuštumų kiekis yra mažas, todėl bandinyje esantis vanduo drenuoja tik iš dalies, o šaldymo metu virsta ledu ir efektyviau ardo jo struktūrą ir taip mažina gniuždomąjį stiprį, palyginti su 150 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniais. Didelis bandinių gniuždomojo stiprio sumažėjimas pastebimas jau po 15 šaldymo-atšildymo ciklų.

Tyrimo rezultatų analizė rodo, kad, lyginant 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos šaldomus ir kontrolinius bandinius po 15, 25 ir 35 šaldymo-atšildymo ciklų, matomas atitinkamai 8,7, 12,4 ir 14,8 % šaldytų bandinių vidutinių gniuždomojo stiprio verčių sumažėjimas. Minėto tankio bandinių įgertis vyksta tik per matricoje suformuotas didesnio skersmens oro tuštumas, nes tarp intarpų (taip pat mažesnių kaip 20,00 mm) esančios tuštumos yra visiškai užpildytos matrica. Iš jų vanduo nepasišalina ir šaldymo metu virsta ledu. Dėl mažesnio bandinio tūryje esančių hidrofobinių intarpų kiekio, palyginti su 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandiniais, matricos sienelių storis tarp jų yra dar didesnis. Didesnis vandens kiekis, esantis matricos sienelių tuštumose, šaldamas dar efektyviau ją ardo ir taip mažina bandinių gniuždomąjį stiprį. Didelis bandinių gniuždomojo stiprio sumažėjimas pastebimas taip pat jau po 15 šaldymo-atšildymo ciklų.

5.14. Degumas

Tyrimo rezultatai rodo, kad skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandiniuose, veikiamuose vienaliepsniu šilumos šaltiniu, kurio našumas yra 70,0 W, nepastebėti liepsnos atsiradimas bei plitimas bandinių paviršiumi. Šio bandymo metu gauti tyrimų rezultatai pateikti 5.2 lentelėje.

5.2 lentelė. Liepsnos, trunkančios 60 s, poveikis skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandiniams

Table 5.2. Influence of flame on composite material samples with different density, exposing it for 60 s

Parametrai	150 kg/m ³ tankio bandinio krašto veikimas	250 kg/m ³ tankio bandinio krašto veikimas	350 kg/m ³ tankio bandinio krašto veikimas
Bandinio užsidegimas (Taip/Ne)	Ne	Ne	Ne
Liepsnos sklidimas iki 10 mm ribos (Taip/Ne)	Ne	Ne	Ne
Liepsnos sklidimo iki 150 mm ribos trukmė, s	-	-	-
Filtrinio popieriaus užsidegimas (Taip/Ne)	Ne	Ne	Ne

Tyrimo metu pastebėta, kad, nepriklausomai nuo kompozitinės medžiagos bandinių tankio, jie nesideformavo (5.28 pav.).



5.28 pav. 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinys eksperimento metu (a) ir po jo (b)

Fig. 5.28. Composite material sample with density of 250 kg/m³ during the test (a) and after it (b)

Atliekant skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių degumo tyrimus vieno degančio objekto bandymu, per pirmųjų 600 sekundžių ekspozicijos laikotarpį nesusidarė krentančių liepsnojančių dalelių ar lašelių (5.29 pav. a), taip pat nebuvo užfiksuotas šoninis liepsnos sklidimas ilguoju bandinio sparpu (5.29 pav. b). Kiti šio bandymo rezultatai pateikti 5.3 lentelėje ir 5.30–5.33 paveiksluose.



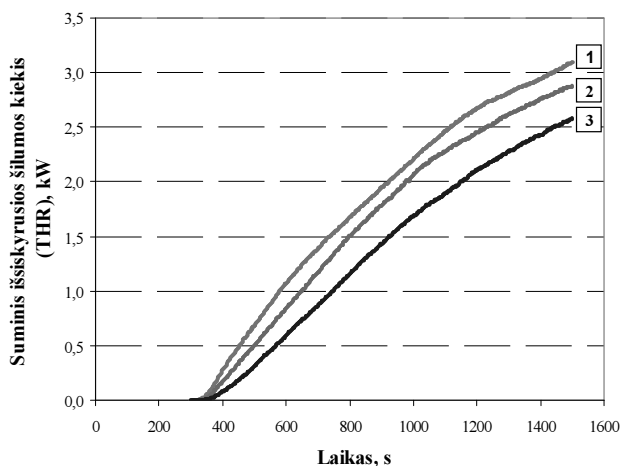
5.29 pav. 250 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinys eksperimento metu (a) ir po jo (b)

Fig. 5.29. Composite material sample with density of 250 kg/m³ during the test (a) and after it (b)

5.3 lentelė. Kiti eksperimento metu gauti tyrimų rezultatai

Table 5.3. Other research results obtained during the test

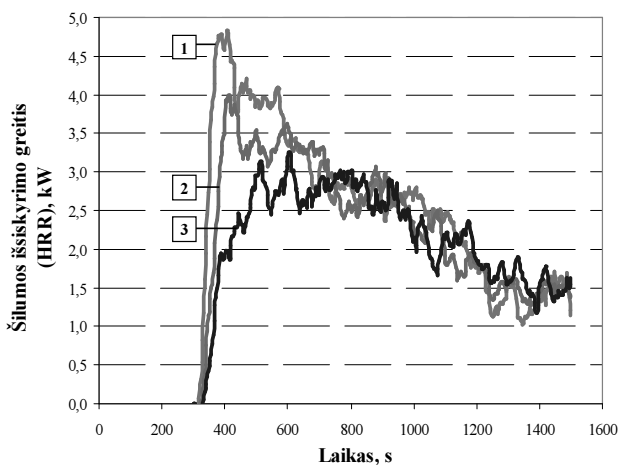
Bandinio tankis, kg/m ³	Suminis šilumos išsiskyrimas per pirmąsias 600 s nuo pagrindinio degiklio įjungimo (THR _{600s}), MJ	Suminis susidariusių dūmų kiekis per pirmąsias 600 s nuo pagrindinio degiklio įjungimo (TSP _{600s}), m ²	Dūmų susidarymo spartos rodiklis SMOGRA, cm ² /s ²	Gaisro didėjimo spartos rodiklis FIGRA, W/s
150	1,9	25,9	0	33,7
250	1,6	22,2	0	25,5
350	1,4	18,7	0	10,7



5.30 pav. Suminis išsiskyrusio šilumos kiekis (THR), kai kompozitinės medžiagos bandinio tankis yra:

1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

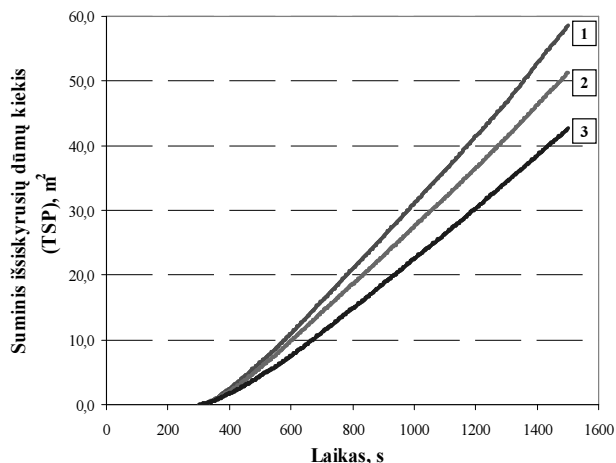
Fig. 5.30. Total heat release (THR), when composite material sample with density of:
1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³



5.31 pav. Šilumos išsiskyrimo greitis (HRR), kai kompozitinės medžiagos bandinio tankis yra:

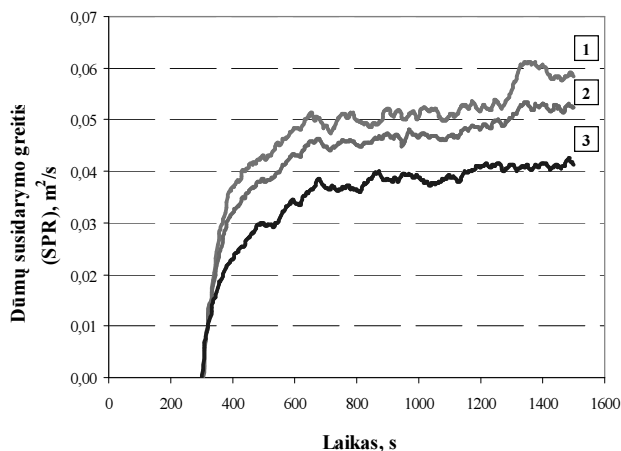
1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Fig. 5.31. Heat release rate (HRR), when composite material sample with density of:
1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³



5.32 pav. Suminis išsiskyrusių dūmų kiekis (TSP), kai kompozitinės medžiagos bandinio tankis yra: 1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Fig. 5.32. Total smoke production (TSP), when composite material sample with density of: 1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

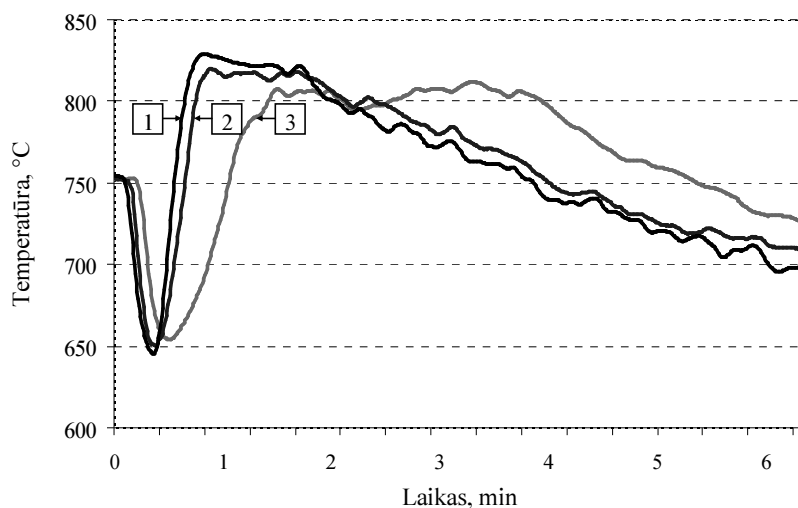


5.33 pav. Dūmų susidarymo greitis (SPR), kai kompozitinės medžiagos bandinio tankis yra: 1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Fig. 5.33. Smoke production rate (SPR), when composite material sample with density of: 1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

Pagal LST EN 13501-1 „Statybos gaminių ir statinio elementų klasifikavimas pagal degumą. 1 dalis. Klasifikavimas pagal degumo bandymų duomenis“ reikalavimus, 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinės medžiagos bandinius galima priskirti A2/B-s1 d0 degumo klasei. Pagal šiuo metu Lietuvoje galiojančią statybinių medžiagų degumo klasifikaciją, jeigu medžiaga patenka tarp A2 ir B degumo klasių, būtina atlikti aukštesnei klasei pasiekti priskiriamus bandymus.

Vienas iš tokių bandymų yra nedegumo bandymas. Jeigu kompozitinė medžiaga neatitinka bent vieno iš šio bandymo punktų reikalavimų, tada konkretūs degumo rodikliai ir grupė nustatomi taikant kitus gaisro bandymų metodus. Bandymų metu gauti rezultatai pateikti 5.34 paveiksle ir 5.4 lentelėje.



5.34 pav. Laiko poveikis krosnies vidaus temperatūrai, kai kompozitinės medžiagos bandinio tankis:
1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

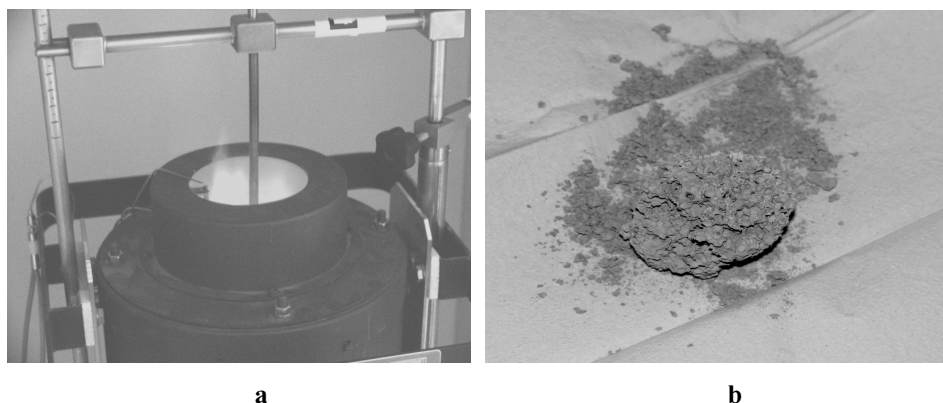
Fig. 5.34. Influence of time on inside temperature of the furnace, when composite material sample with density of:
1 – 150 kg/m³; 2 – 250 kg/m³; 3 – 350 kg/m³

5.4 lentelė. Kiti eksperimento metu gauti tyrimo rezultatai

Table 5.4. Other research results obtained during the test

Bandinio tankis, kg/m^3	Vidutinis temperatūros padidėjimas, $^{\circ}\text{C}$	Vidutinė nenutrūkstamo liepsnojimo trukmė, s	Vidutinis bandinio masės nuostolis, %	Vidutinė bandymo trukmė, s
150	79,6	135	60	1083
250	75,9	120	47	1075
350	66,2	115	38	1121

Tyrimo rezultatai rodo, kad, kompozitinės medžiagos bandinį veikiant didelio šilumos našumo šaltiniu, laiko poveikis temperatūros pasiskirstymui bandinio tūryje yra nežymus. Pradžioje vyksta bandinio išilimas, temperatūra nukrenta iki 650°C . Krosnies viduje esanti aukšta temperatūra greitai skverbiasi į gilesnius kompozitinės medžiagos bandinio sluoksnius ir pasklinda visame jo tūryje. Dėl to prasideda greita degimo reakcija. Nuo eksperimento pradžios praėjus 10–15 s 150 ir 250 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniai pradeda degti atvira liepsna (5.35 pav. a). Per 30 s laiko tarpą krosnyje atsiranda 173°C temperatūros prieaugis. Liepsnojimas trunka apie 2 min. 10 s, jo metu vyrauja pastovi temperatūra (daugiau kaip 800°C). Sudegus intarpams, kompozitinės medžiagos bandinyje atsiranda tuštumos. 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinys praranda vientisumą (5.35 pav. b).



5.35 pav. 150 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinio degimas atvira liepsna (a) ir po eksperimento prarastas vientisumas (b)

Fig. 5.35. Burning of composite material sample with density of 150 kg/m^3 in free flame (a) and loss of integrity after the test (b)

Ilgėnis degimo procesas pastebimas atliekant tyrimus su 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandiniais. Didesnis matricos kiekis bandinio tūryje stabdo šilumos prasiskverbimą į gilesnius jo sluoksnius. Pastebimas lėtesnis degimo procesas, 800°C temperatūros riba pasiekama po 1 min 30 s. Tai paaiškinama tuo, kad storesnės kompozitinės medžiagos matricos sienelės ilgesnį laiką išlieka neperkaitusios, todėl yra apsaugomi intarpai. Aukštesnė kaip 800°C temperatūra išlieka ilgesnį laiką.

Atlikta 150, 250 ir 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinių degimo tyrimo rezultatų analizė rodo, kad juos galima priskirti B-s1, d0 degumo klasei.

5.15. Penktojo skyriaus išvados

1. Sukurta 150, 250 ir 350 kg/m^3 tankio kompozitinė medžiaga, kurioje matrica – poringoji cemento tešla, o intarpai – trupintos PPS pakavimo taros atliekos.
2. Atliktais tyrimais nustatyta, kad kaip APM pasirinktas 0,03 % koncentracijos priedas „Ufapore TCO“ ir vertikali maišyklė efektyviai mažina skystos fazės paviršiaus įtempį ir užtikrina gerą kompozitinės medžiagos matricos porizaciją esant skirtingiems V/C, intarpų kiekiams bei jų granulimetrinei sudėčiai. Optimali kompozitinės medžiagos mišinio maišymo trukmė vertikaloje maišyklėje – 8 minutės.
3. Atlikti kompozitinės medžiagos bandinių struktūros tyrimai rodo, kad naudojant minėtą APM ir maišyklę yra užtikrinamas geras hidrofobinių intarpų iš trupintų PPS pakavimo taros atliekų pasiskirstymas visame bandinio tūryje ir gaunamas glaudus paviršiaus sąlytis tarp matricos ir intarpų.
4. Atlikti tokios kompozitinės medžiagos bandinių, kurių tankis kito $150\text{--}350 \text{ kg/m}^3$ ribose, savybių tyrimai leidžia projektuojant įvertinti minėto tankio kompozitinės medžiagos techninius rodiklius, sprendžiant jos panaudojimo skirtingose pastatų atitvarų konstrukcijose galimybes.
5. Atlikti kompozitinės medžiagos bandinių mechaninių savybių tyrimo rezultatai rodo, kad jų tankiui kintant ($150\text{--}350 \text{ kg/m}^3$) ribose, vidutinė gniuždomojo stiprio vertė kito ($0,05\text{--}0,42 \text{ MPa}$) ribose, lenkiamojo stiprio – ($0,08\text{--}0,39 \text{ MPa}$) ribose, spūdumo – ($2,48\text{--}0,71 \text{ mm}$) ribose, o gniuždančiosios jėgos nuo sutelktosios apkrovos poveikio – ($0,420\text{--}3,326 \text{ kN}$) ribose.
6. Atlikti kompozitinės medžiagos bandinių eksploatacinių savybių tyrimo rezultatai rodo, kad jų tankiui kintant ($150\text{--}350 \text{ kg/m}^3$) ribose, vidutinė

šilumos laidumo koeficiento vertė kito ($0,0493\text{--}0,0955\text{ W/m}\cdot\text{K}$) ribose, vidutinė santykinės garinės varžos koeficiento – ($6,0\text{--}14,8$) ribose, absorbuotos dregmės kiekio dėl higroskopinės sorbcijos, esant santykiniam aplinkos drėgniui $43,2$, $58,2$, $81,1$ ir $94,0\%$, – ($0,0051\text{--}0,1297\text{ kg/kg}$) ribose, o vidutinė standartinė džiūstamojo susitraukimo, drėgniui kintant $30\text{--}6\%$ ribose, – ($0,132\text{--}0,084\text{ mm/m}$) ribose. Šaldomų kompozitinės medžiagos bandinių masės nuostoliai po 15 , 25 ir 35 šaldymo–atšildymo ciklų kito ($0,3\text{--}4,8\%$) ribose, o gniuždomojo stiprio verčių sumažėjimas – ($4,3\text{--}14,8\%$) ribose. 150 , 250 ir 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos bandinius galima priskirti B-s1, d0 degumo klasei.

7. Skirtingo tankio kompozitinės medžiagos bandinių savybių tyrimai rodo, kad savybės priklauso nuo:
 - matricos sienelių kiekio bandinio tūryje bei jų storio;
 - tuštumų, esančių tarp intarpų ir matricoje, pobūdžio;
 - intarpų kiekio bandinio tūryje bei jų granulimetrinės sudėties;
 - V/C .
8. Statybos objektuose tokią kompozitinę medžiagą galima naudoti daugeliui konstrukcijų. Tai galėtų būti:
 - savilaikių sienų ir pertvarų liejimui;
 - grindų, stogų, perdangų šiltinimui;
 - laikančiųjų sienų liejimui (padidinus kompozitinės medžiagos tankį).

Kompozitinės medžiagos gamybos technologija

6.1. Polistireninio putplasčio pakavimo taros atliekų smulkinimo linija

PPS pakavimo taros atliekų smulkinimo technologija ir įrenginiai buvo sukurti vykdant tarptautinio „EUREKA“ projekto programą „E! 3446-SANDPLAST“.

PPS pakavimo taros atliekos yra lengvos, todėl naudoti žinomą smulkinimo įrenginių konstrukciją yra sudėtinga. Joje būtinas papildomas mechanizmas, kuris PPS pakavimo taros atliekas priverstiniu būdu nukreiptų į trupintuvo darbinę zoną. Dėl galimų skirtingų šių atliekų matmenų sukurti tokį mechanizmą yra sudėtinga.

Atlikta PPS pakavimo taros atliekų, esančių Lietuvoje, analizė rodo, kad maksimalūs jų matmenys yra (1300x1400x360) mm (6.1 pav.). Smulkinti tokį lakštą yra sudėtinga dėl šių priežasčių:

- reikalinga plati trupintuvo darbinė zona (plotis 1400 mm), todėl didėja medžiagos pasipriešinimas ardymui, atsiranda papildomų energijos sąnaudų;
- nėra šiam tikslui pritaikytų įrenginių;

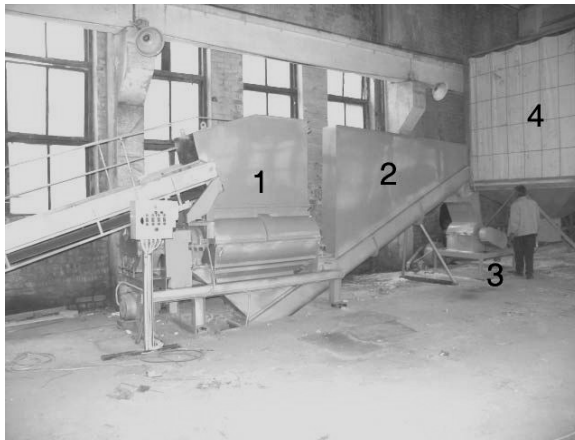
- smulkinimo metu susidaro didelės pasipriešinimo jėgos, todėl būtina didelė smulkinimo įrenginių masė, o tai sudarytų nemažas jų gamybos išlaidas.

PPS pakavimo taros atliekų smulkinimui parinktas dviejų stadijų smulkinimas trupintuvais. Pirmoje stadijoje stambios PPS pakavimo taros atliekos smulkinamos iki (100,0–80,0) mm dydžio (6.2 pav. 1). Šios stadijos trupintuvo konstrukcijai buvo pritaikytas molio maišymo įrenginys, naudojamas keramikos pramonėje. Trupintuvą sudaro du cilindriniai reduktoriai sujungti vienas prieš kitą besisukantys velenai. Ant velenų šachmatine tvarka išdėstytos lopetėlės, skirtos moliui maišyti, o velenų gale sumontuoti sraigtiniai transporteriai. Vietoje molio maišymo lopetėlių sumontavus diskinius peilius, gautas naujos konstrukcijos PPS pakavimo taros atliekų trupintuvas. Peiliuose išfrezuotų išėmų dydis riboja trupinamų PPS pakavimo taros atliekų dydį peilio atžvilgiu, o patys peiliai ant kiekvieno veleno yra išdėstyti viena tiese. Toks konstrukcinis sprendimas užtikrina žingsninį PPS pakavimo taros atliekų tiekimą į trupintuvo darbinę zoną.



6.1 pav. PPS pakavimo taros atliekos prieš smulkinimą
Fig. 6.1. Waste EPS packages before crushing

Vėliau PPS pakavimo taros atliekos smulkinamos antros stadijos trupintuve iki (20,0–1,0) mm dydžio. Tokio tipo trupintuvai šiuo metu plačiai naudojami PPS gamybos įmonėse. Vienas iš tokių trupintuvų buvo atitinkamai perdarytas ir pritaikytas didesnio tankio PPS pakavimo taros atliekoms smulkinti (6.2 pav. 3).



6.2 pav. PPS pakavimo taros atliekų smulkinimo linija: 1 – pirmos stadijos trupintuvas; 2 – sraigtinis transporteris; 3 – antros stadijos trupintuvas; 4 – bunkeris

Fig. 6.2. Crushing line for waste EPS packages: 1 – first stage crusher; 2 – screw transporter; 3 – second stage crusher; 4 – bunker

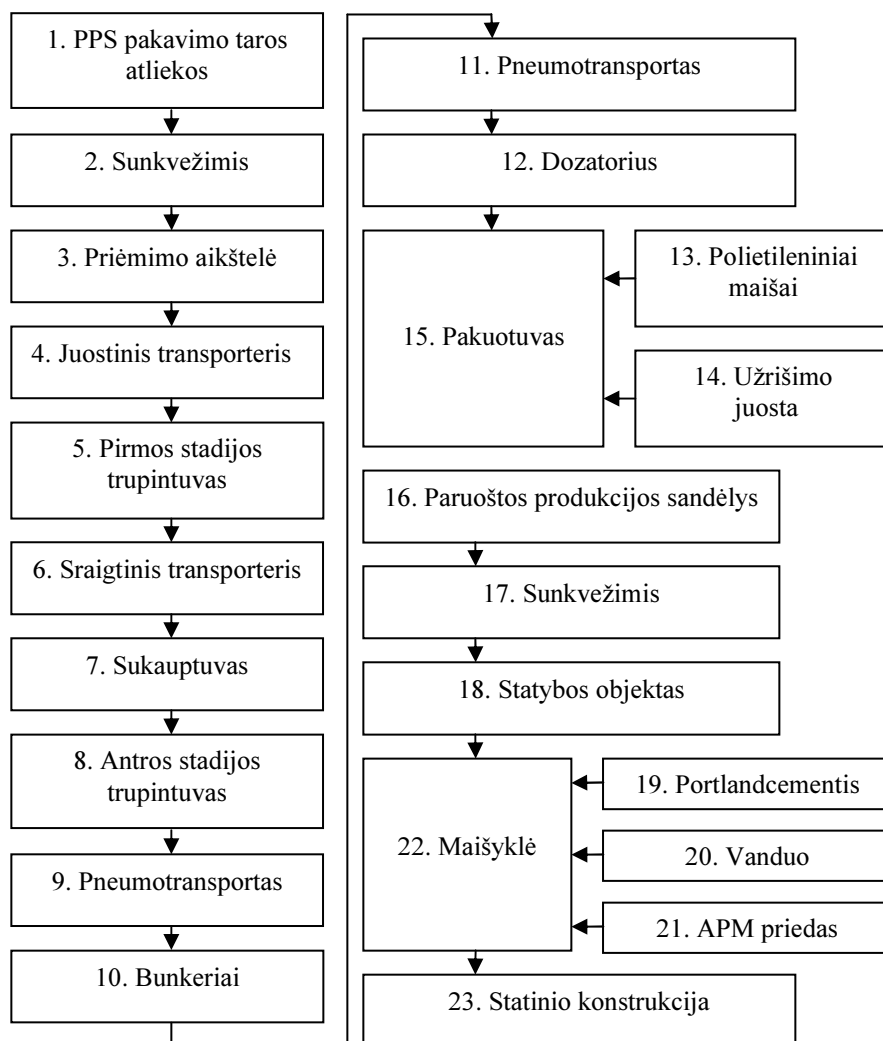
Kad būtų galima sujungti dviejų stadijų trupintuvus, buvo sukurtas sraigtinis transporteris, sumontuotas kampu pirmos stadijos trupintuvo apatinėje dalyje (6.2 pav. 2). Smulkintos PPS pakavimo taros atliekos juo tiekiamos iš pirmos stadijos trupintuvo darbinės zonos į antros stadijos trupintuvo nukreipimo latako vidų. Virš sraigtinio transporterio yra nedidelis atliekų kaupimo bunkeris, užtikrinantis nenutrūkstamą antros stadijos trupintuvo darbą.

Smulkintos PPS pakavimo taros atliekos naudojant pneumotransportą vamzdynu tiekiamos iš antros stadijos trupintuvo į kaupimo bunkerius (6.2 pav. 4). Šioje sistemoje yra sklendės, užtikrinančios minėtų atliekų tiekimą į tris kaupimo bunkerius, užteršto oro valymo sistema ir kaupimo bunkerių užpildymą fiksuojantys davikliai, reguliuojantys pneumotransporto darbą.

6.2. Kompozitinės medžiagos gamybos technologinė schema

Atlikus tokios kompozitinės medžiagos gamybos būdų analizę nustatyta, kad juos sudaro dvi stadijos. Pirmoje stadijoje naudojant APM ar kitas medžiagas panaikinama tarpų iš PPS pakavimo taros atliekų hidrofobinė prigimtis, o antroje stadijoje maišyklėje ruošiamas kompozitinės medžiagos mišinys. Maišant visas kompozitinės medžiagos sudedamąsias dalis kartu, galima

supaprastinti jos gamybą, nes nebereikia papildomai apdirbti PPS intarpų. Smulkintų PPS pakavimo taros atliekų hidrofobinė prigimtis panaikinama su APM maišyklėje kompozitinės medžiagos mišinio maišymo metu. Kompozitinės medžiagos gamybos proceso technologinė schema pateikta 6.3 paveiksle.



6.3 pav. Kompozitinės medžiagos gamybos technologinė schema

Fig. 6.3. Technological scheme for composite material production

PPS pakavimo taros atliekos (1), kurių matmenys ne didesni kaip (1300x1400x360) mm, surenkamos ir sunkvežimiu (2) vežamos į priėmimo aikštelę (3), kur juostiniu transporteriu (4) tiekiamos į pirmos stadijos trupintuvą (5) ir jame trupinamos iki (100,0–80,0) mm dydžio. Po to sraigtiniu transporteriu (6) smulkintos PPS pakavimo taros atliekos patenka į sukauptuvą (7), o iš jo į antros stadijos trupintuvą (8), kuriame smulkinamos iki (20,0–1,0) mm dydžio. Susmulkintos iki reikiamo dydžio PPS pakavimo taros atliekos pneumotransportu (9, 11) tiekiamos į bunkerius (10), o iš jų – į dozatorių (12). Iš dozatoriaus trupintos PPS pakavimo taros atliekos patenka į pakuotuvą (15), kuris jas supila į 0,3 m³ talpos polietileningus maišus (13) ir juos užriša juosta (14). Iš paruoštos produkcijos sandėlio (16) į statybos objektą (18) supakuotos trupintos PPS pakavimo taros atliekos vežamos sunkvežimiu (17). Čia rankiniu būdu į maišyklę (22) pilamas reikiamas kiekis portlandcemenčio (19), vandens (20), APM priedo (21) ir smulkintų PPS pakavimo taros atliekų. Paruoštas kompozitinės medžiagos mišinys naudojamas statinio konstrukcijai montuoti arba šiltinti (23).

6.3. Šeštojo skyriaus išvados

1. PPS pakavimo taros atliekų smulkinimui parinktas dviejų stadijų smulkinimas trupintuvais. Pirmoje stadijoje stambios PPS pakavimo taros atliekos smulkinamos iki (100,0–80,0) mm dydžio, o antroje – iki (20,0–1,0) mm dydžio.
2. Maišant visas kompozitinės medžiagos sudedamąsias dalis kartu, galima supaprastinti jos gamybą, nes nebereikia papildomai apdirbti PPS intarpų. Smulkintų PPS pakavimo taros atliekų hidrofobinė prigimtis panaikinama su APM maišyklėje kompozitinės medžiagos mišinio maišymo metu.

Bendrosios išvados

1. Ištirtos skirtingos rūšies ir koncentracijų vandeninių aktyviųjų paviršiaus medžiagų (APM) tirpalų savybės leido nustatyti maksimalų sukibties darbą, užtikrinantį gerą hidrofobinių kompozitinės medžiagos intarpų dengimą matrica ir efektyvų oro tuštumų formavimą joje. Didžiausios vandeninių APM tirpalų sukibties darbo vertės gautos jų koncentracijai esant 0,099 %.

2. Tyrimų rezultatai rodo, kad visos APM intensyviausiai mažina cemento tešlos tankį (ją porizuoja) per pirmąsias 10 maišymo minučių. Nustatyta, kad, priklausomai nuo APM rūšies ir maišymo trukmės, vertikalios maišyklės efektyvumas yra didesnis nei horizontalios. Cemento tešlos tankio (ρ_{ct}) ir cemento akmens tankio (ρ_{ca}) tarpusavio ryšys, maišant efektyvesne maišykle, išreiškiamas $\rho_{ca} = -25,4327 + 0,9651 \cdot \rho_{ct}$ lygtimi ($R^2 = 0,994$, $s_e = 27,21 \text{ kg/m}^3$).

3. Parinktos 150, 250 ir 350 kg/m^3 tankio kompozitinės medžiagos formavimo mišinių sudėtys ir sukurtas vienos stadijos jos gamybos būdas, leidžiantis atsisakyti papildomo hidrofobinių intarpų paviršiaus apdirbimo proceso. Rekomenduojami kompozitinės medžiagos gamybos technologiniai veiksniai yra šie:

- vertikali maišyklė ir maišymo trukmė joje – 8 min.;
- „Ufapore TCO“ APM kiekis – 0,03 %, skaičiuojant nuo portlandcemenčio masės;

- V/C – 0,80, 0,65 ir 0,50 atitinkamai bandinių tankiui;
- tarpų dydis – ne didesnis kaip 5,00 mm – 150 kg/m³ tankio bandiniams ir mažesnis kaip 20,00 mm – 250 ir 350 kg/m³ tankio bandiniams.

4. Sukurta 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio kompozitinė medžiaga, kurioje matrica – poringoji cemento tešla, o tarpai – trupintos polistireninio putplasčio (PPS) pakavimo taros atliekos. Jos bandinių struktūros tyrimai rodo, kad naudojant minėtą APM ir maišyklę yra užtikrinamas geras hidrofobinių tarpų pasiskirstymas visame bandinio tūryje ir gaunamas glaudus sąlytis tarp matricos ir tarpų.

5. Atlikti 150, 250 ir 350 kg/m³ tankio minėtos kompozitinės medžiagos bandinių savybių tyrimai leidžia projektuojant įvertinti jos techninius rodiklius, sprendžiant panaudojimo skirtingose pastatų atitvarų konstrukcijose galimybes. Pagrindinės minėto tankio bandinių savybės yra šios:

- gniuždomasis stipris – 0,05, 0,20 ir 0,42 MPa;
- lenkiamasis stipris – 0,08, 0,25 ir 0,39 MPa;
- šilumos laidumo koeficientas vidutinėje 10 °C temperatūroje – 0,0493, 0,0730 ir 0,0955 W/m·K;
- kapiliarinės įgerties koeficientas kinta atitinkamai (269,6–104,3), (137,7–59,6) ir (55,1–24,2) g/m²·s^{0,5} ribose;
- santykinės garinės varžos koeficientas – 6,0, 12,2 ir 14,8;
- bandinius galima priskirti B-s1, d0 degumo klasei.

6. Sukurta naujos kompozitinės medžiagos gamybos technologinė schema ir įdiegta PPS pakavimo taros atliekų trūpinimo technologinė linija. Šie veiksniai sudaro galimybę termoizoliacinių medžiagų rinkai pasiūlyti pigesnius gaminius lyginant su kitais rinkoje esančiais analogiškais gaminiais.

Literatūra ir šaltiniai

Addy, M.; Jenkins, S.; Newcombe, R. 1989. Studies on the effect of tooth paste rinses on plaque regrowth. (I). Influence of surfactants on chlorhexidine efficacy, *Journal of Clinical Periodontology* 16(6): 380–384.

AKZO NOBEL NV. 1999 11 09. *Use of alkoxylated alkanolamide together with ethoxylated alcohol as a friction reducing agent*. Inventors: M. Hellsten, I. Harwigsson. Int. Cl.⁷: C11 D1/94. *US patent*, 5979479.

Alexander, M. G; Mindess, S. 2005. *Aggregates in concrete*. London: Taylor & Francis Group. 435 p. ISBN 0-415-25839-1.

Asthana, R.; Kumar, A.; Dahotre, N. B. 2006. *Materials Processing and Manufacturing Science*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann. 628 p. ISBN 0-7506-7716-3.

Azab, M. M.; Bader, S. K.; Shaaban, A. F. 2001. Nonionic surfactants based on copolymers of dioctyl itaconate with dioxypopylated itaconic acid, *Pigment & Resin Technology* 30 (6): 388–394.

Babu, D. S.; Babu, G. K.; Wee, T. H. 2005. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash, *Cement and Concrete Research* 35(6): 1218–1223.

Babu, D. S.; Babu, K. G.; Tiong-Huan, W. 2006. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites* 28(6): 520–527.

Babu, K. G.; Babu, D. S. 2003. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume, *Cement and Concrete Research* 33(5): 755–762.

Bagon, C.; Frondistou-Yannas, S. 1976. Marine floating concrete made with polystyrene beads, *Magazine of Concrete Research* 28(97): 225–229.

Bayer, E. C. 1924 05 16. *Verfahren zur Herstellung von porösen Baumaterialien*. Schweiz Patentschrift, 104965, CH 104965 (A).

Bajouk B. M.; Sköld R. O. 2003. Association and solubility studies of mixed polyglycol ether surfactants in water, *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects* 212(1): 65–77.

Barbero, E. J. 1999. *Introduction to composite materials design*. Philadelphia: Taylor & Francis Inc. 336 p. ISBN 1-56032-701-4.

Binks, B. P.; Horozov, T. S. 2005. Aqueous foams stabilized solely by silica nanoparticles, *Angewandte Chemie* 44(24): 3722–3725.

Byun, K. J. Song, H. W. Park, S. S. 1998. Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent, in *Proc. of the IXth International congress on polymers in concrete "ICPIC-98"*, Bologna, Italy, 1998.

Bogue, R. H. 1955. *The chemistry of portland cement*. 2nd ed. New York: Reinhold Publishing Corp. 793 p.

Brito, R. M. M.; Vaz, W. L. C. 1986. Determination of the critical micelle concentration of surfactants using the fluorescent probe N-phenyl-1-naphthylamine, *Analytical Biochemistry* 152(1): 250–255.

Bruere, G. M. 1955. Air entrainment in cement and silica pastes, *Journal of the American Concrete Institute* 26(9): 905–920.

Buzzacchi, M.; Schmiedel, P.; Rybinski, W. 2006. Dynamic surface tension of surfactant systems and its relation to foam formation and liquid film drainage on solid surfaces, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 273(1–3): 47–54.

Cabrillac, R., et al. 2006. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concrete and of the adjustment parameters on the induced porosity, *Construction and Building Materials* 20(5): 286–295.

Cases, J. M., et al. 2002. Long chain ionic surfactants: the understanding of adsorption mechanisms from the resolution of adsorption isotherms, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 205(1–2): 85–99.

Chandar, P., et al. 1987. Variation in nitroxide probe chain flexibility within sodium dodecyl sulfate hemimicelles, *Journal of Physical Chemistry* 91(1): 148–150.

Chatterji, S. 2003. Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents, *Cement and Concrete Composites* 25(7): 759–765.

Chawla, K. K. 1987. *Composite materials. Science and engineering*. New York: Springer-Verlag Inc. 292 p. ISBN 9780387964782.

Chen, B.; Liu, J. 2004. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber, *Cement and Concrete Research* 34(7): 1259–1263.

Chen, B.; Liu, J. 2007. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads, *Construction and Building Materials* 21(1): 7–11.

Coffman, R. E.; Kildsig, D. O. 1996. Effect of nicotinamide and urea on the solubility of riboflavin in various solvents, *Journal of Pharmaceutical Sciences* 85(9): 951–954.

CONSTRUCTION RESEARCH & TECHNOLOGY GMBH. 2006 12 21. *Method of delivery of agents providing freezing and thawing resistance to cementitious compositions*. Inventor: ONG, F. Int. Cl.²: C04 B 40/00. *Canadian Patent*, 2611895.

Cook, D. J. 1973. Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete, *Precast Concrete* 4(12): 691–693.

Corr, D. J., *et al.* 2002. Air void morphology in fresh cement pastes, *Cement and Concrete Research* 32(7): 1025–1031.

Četkauskaitė, A. 1999. Ekotoksikologija. Cheminių medžiagų veikimo mechanizmai [interaktyvus]. Vilnius: Vilniaus Universiteto leidykla [žiūrėta 2008 m. sausio 25 d.] Prieiga per internetą: <<http://www.bbk.gf.vu.lt/Ecotox1999.html>>.

Day, K. W. 1999. *Concrete mix design, quality control and specification*. 2nd ed. London: E&FN Spon. 391 p. ISBN 0-419-24330-5.

Dalgleish, D. G. 2003. Food emulsions: their structures and properties, in S. E. Friberg; K. Larsson; J. Sjöblom, Eds. *Food emulsions*. 4th ed., revised and expanded. New York: Marcel Dekker Inc. 1–44.

Daniel, I. M.; Ishai, O. 1994. *Engineering mechanics of composite materials*. New York: Oxford University Press. 416 p. ISBN 0-19-509738-6.

Daukšas, K., *et al.* 2003. *Chemijos terminų aiškinamasis žodynas*. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas. 660 p. ISBN 5-420-01510-2.

De Rose, L.; Morris, J. 1999. The influence of mix design on the properties of micro-cellular concrete, in R. K. Dhir; N. A. Handerson, Eds. *Specialist techniques and materials for construction*. London: Thomas Telford, 185–197.

De Vendittis, E., *et al.* 1981. A fluorimetric method for the estimation of the critical micelle concentration of surfactants, *Analytical Biochemistry* 115(2): 278–286.

Decesari, S., *et al.* 2003. Solubility properties of surfactants in atmospheric aerosol and cloud/fog water samples, *Journal of Geophysical Research* 108(D21): AAC6.1–AAC6.9.

Deltuva, J., *et al.* 1982. *Statybinės medžiagos: vadovėlis aukštųjų mokyklų statybinių specialybių studentams*. Vilnius: Mokslas. 348 p.

Dodson, V. H. 1990. *Concrete admixtures*. New York: Van Nostrand Reinhold. 211 p. ISBN 0442001495.

DOW CHEMICAL CO. 1989 01 24. *Aqueous bleach compositions thickened with a viscoelastic surfactant*. Inventors: G. D. Rose, A. S. Teot, K. L. Foster. Int. Cl¹³: A01 N25/24. *US patent*, 4800036 (A).

Drummond, J. C.; Wells, D. 1998. Nonionic lactose and lactitol based surfactants: comparison of some physico-chemical properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 141(1): 131–142.

Du, L.; Folliard, K. J. 2005. Mechanisms of air entrainment in concrete, *Cement and Concrete Research* 35(8): 1463–1471.

Durack, J. M.; Weiqing, L. 1998. The properties of foamed air cured fly ash based concrete for masonry production, in *Proc. of the 5th Australian Masonry Conference, Gladstone, Queensland, Australia, 1998*. 129–138.

Eldridge, J. M. 1997. The analysis of surfactants in cosmetics, in M. M. Rieger; L. D. Rhein, Eds. *Surfactants in cosmetics*. 2nd ed., revised and expanded. Surfactant science series. New York: Marcel Dekker Inc. Vol 68, 83–104.

Elworthy, P. H.; Florence, A. T.; Macfarlane, C. B. 1968. *Solubilization by surface active agents and its applications in chemistry and biological sciences*. London: Chapman and Hall Ltd. 288 p. ISBN 0412090309.

Esumi, K.; Nagahama, T.; Meguro, K. 1991. Characterization of cationic surfactant absorbed layer on silica, *Colloids and Surfaces* 57(1): 149–160.

Esumi, K.; Otsuka, H.; Meguro, K. 1990. Study of surfactant layer on alumina by ESR spin probe technique, *Journal of Colloid and Interface Science* 136(1): 224–230.

Exerowa, D.; Kruglyakov, P. M. 1998. *Foam and foam films-theory, experiment, application*. Amsterdam: Elsevier Science B. V. 796 p. ISBN 0444819223.

Fagerlund, G. 1990. Air-pore instability and its effect on the concrete properties, *Nordic Concrete Research* 9: 39–52.

Fiechter, A. 1992. Biosurfactants: moving towards industrial application, *Trends in Biotechnology* 10(6): 208–217.

Franklin, R.; Hoey, M.; Premachandran, R. 2002. The use of surfactants to generate viscoelastic fluids, in T. Balson, et al., Eds. *Chemistry in the oil industry VII-performance in a challenging environment*. Cambridge: Royal Society of Chemistry. 96–106.

Gaevoi, V. A.; Kuts, V. S.; Kovalev, V. I. 1991. Molecular nature of hydrotropic action of sodium toluenesulfonate in micellar solutions of anionic surfactants, *Theoretical and Experimental Chemistry* 27(5): 527–533.

Girnienė, I.; Laukaitis, A.; Dudik, A. 2000. Influence of surfactants on foam properties, *Materials Science (Medžiagotyra)* 6(4): 316–320.

- González, G.; Nassar, E. J.; Zaniquelli, M. E. D. 2000. Examination of the hydrotropic effect of sodium p-toluenesulfonate on a nonionic surfactant ($C_{12}E_6$) solution, *Journal of Colloid and Interface Science* 230(2): 223–228.
- Guan, H., et al. 2007. Investigation of the electromagnetic characteristics of cement based composites filled with EPS, *Cement and Concrete Composites* 29(1): 49–54.
- Gupta, C. K. 2003. *Chemical metalurgy-principles and practice*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 811 p. ISBN 3-527-30376-6.
- Gau, C. S.; Zografis, G. 1990. Relationship between absorption and wetting of surfactant solutions, *Journal of Colloid and Interface Science* 140(1): 1–9.
- Hall, C. 1989. Water sorptivity of mortar and concretes: a review, *Magazine of Concrete Research* 41(147): 51–61.
- Hofmann, E. 1889 04 18. *Verfahren zur herstellung poröser steine als isolir- und wärmeschutz-mittel*. Int. Cl.⁴: C04 B28/00. *Deutschen reiche, classe 80, patentschrift № 55919, DE 55919 (C)*.
- Holmberg, K., et al. 2003. *Surfactants and polymers in aqueous solution*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 562 p. ISBN 0-471-49883-1.
- Hough, D. B.; Rendal, H. M. 1983. Adsorption of ionic surfactants, in C. D. Parfitt; C. H. Rochester, Eds. *Adsorption from solution at the solid/ liquid interface*. New York: Academic Press. 247–319.
- HUELS CHEMISCHE WERKE AG. 1999. 10. 12. *Aqueous viscoelastic surfactant solution for hair and skin cleaning*. Inventor: D. Balzer. Int. Cl.¹⁴: A61 K8/20. *US patent 5965502 (A)*.
- Iliev, Tz. H.; Dushkin, C. D. 1992. Dynamic surface tension of micellar solutions studied by the maximum bubble pressure method. 1. Experiment, *Colloid and Polymer Science* 270(4): 370–376.
- Inoue, T.; Ohmura, H.; Murata, D. 2003. Cloud point temperature of polyoxyethylene-type nonionic surfactants and their mixtures, *Journal of Colloid and Interface Science* 258(2): 374–382.
- Ivanauskas, E. 2006. *Savaime sutankėjančio betono struktūros analizė ir savybių tyrimai*. Daktaro disertacija, Kaunas: KTU. 114 p.
- Iwanaga, T.; Kunieda, H. 2000. Effect of added salts or polyols on the cloud point and the liquid-crystalline structures of polyoxyethylene-modified silicone, *Journal of Colloid and Interface Science* 227(2): 349–355.
- Jacobi, G.; Löhr, A.; Schwuger, M. J. 1987. *Detergents and textile washing-principles and practice*. New York: VCH Publishers. 248 p. ISBN 0895736861.
- Janczuk, B. 2006. Adhesion of air bubbles to mineral surfaces in the presence of liquids, in P. Somasundaran, Eds. *Encyclopedia of surface and colloid science*. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group. 97–112.

- Januševičienė, J. 1967. *Koloidų chemijos laboratoriniai darbai*. Vilnius: Mintis. 135 p.
- Jasiukevičius, V., et al. 1963. *Bendroji silikatų technologija*. Vilnius: Valstybinė politinės ir mokslinės literatūros leidykla. 380 p.
- Jones, M. R. 2001. Foamed concrete for structural use, in *Proc. of one day seminar on foamed concrete: properties, applications and latest technological developments, Loughborough, UK, 2005*. Loughborough, 27–60.
- Jones, M. R.; McCarthy, A. 2005. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, *Magazine of Concrete Research* 57(1): 21–31.
- Jones, M. R.; McCarthy, A. 2005. Utilising unprocessed low-lime coal ash in foamed concrete, *Fuel* 84(11): 1398–1409.
- Jones, M. R.; McCarthy, A. 2006. Heat of hydration in foamed concrete: effect of mix constituents and plastic density, *Cement and Concrete Research* 36(6): 1032–1041.
- Jones, M. R.; McCarthy, M. J.; McCarthy, A. 2003. Moving fly ash utilization in concrete forward: a UK perspective, in *Proc. of the 2003 International Ash Utilisation Symposium*. University of Kentucky: Centre for Applied Energy Research, 20–22.
- Kaya, A.; Lloyd, T. B.; Fang, H. Y. 2000. Interfacial parameters and work of adhesion in soil-liquid systems, *Geotechnical Testing Journal* 23(4): 464–471.
- Kalamkarov, A. L.; Kolpakov, A. G. 1997. *Analysis, design and optimization of composite structures*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 366 p. ISBN 0-471-97189-8.
- Kearsley, E. P. 1996. The use of foamed concrete for affordable development in third world countries, in R. K. Dhir; M. J. McCarthy, Eds. *Appropriate concrete technology*. London: E & FN Spon, 233–243.
- Kearsley, E. P., Visagie, M. 1999. Micro-properties of foamed concrete, in R. K. Dhir; N. A. Handerson, Eds. *Specialist techniques and materials for construction*. London: Thomas Telford, 173–184.
- Kearsley, E. P.; Booyens, P. J. 1998. Reinforced foamed concrete, can it be durable, *Concrete/Beton* 91: 5–9.
- Kearsley, E. P.; Wainwright, P. J. 2001. Porosity and permeability of foamed concrete, *Cement and Concrete Research* 31(5): 805–812.
- Koopal, L., et al. 1999. The effect of cationic surfactants on wetting, colloid stability and flotation of silica, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 151(1–2): 15–25.
- Koza, E., et al. 2003. Compressive strength of aluminium foams, *Materials Letters* 58(1–2): 132–135.
- Laukaitis, A. 2000. *Akytųjų betono formavimo mišinių ir gaminių savybės*. Monografija. Vilnius: Technika. 231 p. ISBN 9986-05-420-6.

Laukaitis, A.; Fiks, B. 2006. Acoustical properties of aerated autoclaved concrete, *Applied Acoustics* 67(3): 284–296.

Laukaitis, A.; Žurauskas, R.; Kerienė, J. 2005. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, *Cement and Concrete Composites* 27(1): 41–47.

Laukaitis, A.; Sinica, M. 2006. *Beautoklavis akylasis betonas ir kompozitiniai jo gaminiai: monografija*. Vilnius: Technika. 236 p. ISBN 9986-05-977-1.

Le Roy, R.; Parant, E.; Boulay, C. 2005. Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction, *Cement and Concrete Research* 35(4): 770–775.

Lecomte du Noüy, P. 1919. A new apparatus for measuring surface tension, *Journal of General Physiology* 1(5): 521–524.

Levitz, P.; Van Damme, H.; Keravis, D. 1984. Fluorescence decay study of the adsorption of nonionic surfactants at the solid–liquid interface. 1. Structure of the adsorption layer on a hydrophilic solid, *Journal of Physical Chemistry* 88(11): 2228–2235.

Lyklema, J. 2000. *Fundamentals of interface and colloid science. Volume III. Liquid–fluid interfaces*, London: Academic Press. 751 p. ISBN 0-12-460523-0.

Lylyk, S., et al. 1998. The effect of capillary characteristics on the results of dynamic surface tension measurements using the maximum bubble pressure method, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 135(1–3): 27–40.

Liugienė, V.; Lukšėnienė, J.; Budrienė, S. 2006. Modernios tapybos tvirtinimo polimerais tyrimas, *Lietuvos dailės muziejaus metraštis* 8: 24–41.

López-Trosell, A. I. 2005. *Effects of nonionic surfactants on the interactions of different nanoparticle materials on glass surfaces*. Doctor der naturwissenschaften genehmigte dissertation. Berlin: Der Technischen Universität Berlin. 114 p.

LST EN 13163:2003/AC:2006. Statybiniai termoizoliaciniai gaminiai. Gamykliniai polistireninio putplasčio (EPS) gaminiai. Techniniai reikalavimai. Vilnius, 2007. 5 p.

LST 1341:1995. Betonas ir gelžbetonis. Komponentai ir gaminiai. Terminai ir apibrėžimai. Vilnius, 1995. 121 p.

LST EN 12620:2003+A1:2008. Betono užpildai. Vilnius, 2008. 56 p.

LST EN 13163:2003. Statybiniai termoizoliaciniai gaminiai. Gamykliniai polistireninio putplasčio (EPS) gaminiai. Techniniai reikalavimai. Vilnius, 2003. 38 p.

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

Lunkenheimer, K.; Wantke, K. D. 1981. Determination of the surface tension of surfactant solutions applying the method of Lecomte du Noüy (ring tensiometer), *Colloid and Polymer Science* 259(3): 354–366.

Makkar, R. S.; Rockne, K. J. 2003. Comparison of synthetic surfactants and biosurfactants in enhancing biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons, *Environmental Toxicology and Chemistry* 22(10): 2280–2292.

Mandal, A. B.; Nair, B. U. 1991. Cyclic voltammetric technique for the determination of the critical micelle concentration of surfactants, self-diffusion coefficient of micelles, and partition coefficient of an electrochemical probe, *Journal of Physical Chemistry* 95(22): 9008–9013.

Manne, S., *et al.* 1994. Direct visualization of surfactant hemimicelles by force microscopy of the electrical double layer, *Langmuir* 10(12): 4409–4413.

Manne, S., *et al.* 1997. Gemini surfactants at solid–liquid interfaces: control of interfacial aggregate geometry, *Langmuir* 13(24): 6382–6387.

Marčiukaitis, G. 1998. *Statybinių kompozitų kūrimo ir savybių prognozavimo principai*. Vilnius: Technika. 136 p. ISBN 9986-05-353-6.

Martusevičius, M.; Kaminskas, R.; Mituzas, J. A. 2002. *Rišamųjų medžiagų cheminė technologija*. Kaunas: Technologija. 206 p. ISBN 9955-09-255-6.

McCormick, F. C. 1967. Rational proportioning of preformed foam cellular concrete, *Journal of the American Concrete Institute* 64(2): 104–110.

Mielenz, R. C., *et al.* 1958. Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete: Part 1. Entrained air in unhardened concrete, *Journal of the American Concrete Institute*, 30(1): 95–121.

Myers, D. 1999. *Surfaces, interfaces, and colloids : principles and applications*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc. 501 p. ISBN 0-471-33060-4.

Myers, D. 2006. *Surfactant science and technology*, 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc. 400 p. ISBN 0-471-68024-9.

Miller, R.; Lunkenheimer, K. 1983. On the determination of equilibrium surface tension values of surfactant solutions, *Colloid and Polymer Science* 261(7): 585–590.

Mindess, S.; Young, J. F. 1981. *Concrete*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 671 p. ISBN 0131671065.

Mino, J. 1987. Detergency advances in Japan, in W. G. Cutler; E. Kissa, Eds. *Detergency: theory and practice*. Surfactant science series. New York: Marcel Dekker Inc. Vol 20, 481–530.

Moroi, Y., *et al.* 1986. Anionic surfactants with divalent gegenions of separate electric charge: solubility and micelle formation, *Journal of Colloid and Interface Science* 113(1): 225–231.

Morrison, I. 2006. *Lecture 2: surfactants*. [interaktyvus]. SURFA TECH CORPORATION [žiūrėta 2008 m. vasario 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://surfatech.net/pdfs/Dispersant%20Surfactant.pdf>>.

Musnickas, J. 2001. *Riebalai ir aliejai. Muilai. Paviršinio aktyvumo medžiagos. Plovikliai*. Kaunas: Technologija. 175 p. ISBN 9955-09-015-4.

Nambiar, E. K. K.; Ramamurthy, K. 2006. Influence of filler type on the properties of foam concrete, *Cement and Concrete Composites* 28(5): 475–480.

Nambiar, E. K. K.; Ramamurthy, K. 2006. Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology, *Cement and Concrete Composites* 28(9): 752–760.

Nambiar, E. K. K.; Ramamurthy, K. 2007. Air-void characterization of foam concrete, *Cement and Concrete Research* 37(2): 221–230.

Nambiar, E. K. K.; Ramamurthy, K. 2007. Sorption characteristics of foam concrete, *Cement and Concrete Research* 37(9): 1341–1347.

Naujokaitis, A. P. 2007. *Statybinės medžiagos. Betonai: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika. 355 p. ISBN 9789955282099.

Nehdi, M.; Rahman, M. -A. 2004. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction, *Cement and Concrete Research* 34(11): 1993–2007.

Neidleman, S. L. 1987. Surfactants and biotechnology, in M. J. Rosen, Eds. *Surfactants in emerging technologies*. Surfactant science series. New York: Marcel Dekker Inc. Vol 26, 131–144.

Neuberg, C. 1916. Hydrotropy, *Biochemische Zeitschrift* 76: 107–176.

Packham, D. E. 1996. Work of adhesion: contact angles and contact mechanics, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 16(2): 121–128.

Pandit, N. K., *et al.* 1995. Phase behavior of aqueous solutions containing nonionic surfactant – polyethylene glycol mixtures, *International Journal of Pharmaceutics* 122(1–2): 27–33.

Park, S. B. Yoon, E. S.; Lee, B. I. 1998. Effects of processing and materials variations on mechanical properties of lightweight composites, *Cement and Concrete Research* 29(2): 193–200.

Perez, L. E. B.; Cortez L. A. B. 1997. Potential for the use of pyrolytic tar from baggase in industry, *Biomass and Bioenergy* 12(5): 363–366.

Perry, S. H.; Bischoff, P. H.; Yamura, K. 1991. Mix details and material behaviour of polystyrene aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research* 43(154): 71–76.

Polefka, T. G. 1999. Surfactants interactions with skin, in U. Zoller; G. Broze, Eds. *Handbook of detergents, part a: properties*. Surfactant science series. New York: Marcel Dekker. Vol 82, 433–468 p.

Powers, T. C. 1968. *The properties of fresh concrete*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 686 p. ISBN 0-471-69590-4.

Quinn, P. J.; Markey, B. K. 2001. Disinfection and disease prevention in veterinary medicine, in S. S. Block, Eds. *Desinfection, sterilization, and preservation*. 5th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. 1069–1103.

Radbound University [interaktyvus]. 2007. *Virtual classroom biology, FESEM applications: amphiphiles*. [žiūrėta 2008 01 20]. Prieiga per internetą: <<http://www.vcbio.science.ru.nl/en/fesem/applets/amphiphiles>>.

Rao, V. S. 1999. *Principles of weed science*: 2nd ed. Enfield: Science publishers Inc. 555 p. ISBN 1-57808-069-X.

Rasaiah, J. C. 2001. Statistical mechanics of strongly interacting systems : liquids and solids, in I. H. Moore; N. D. Spencer, Eds. *Encyclopedia of chemical physics and physical chemistry, vol.1: fundamentals*, Bristol: Institute of Physics. 379–476.

Ravindrarajah, R. S.; Tuck, A. J. 1994. Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads, *Cement and Concrete Composites* 16(4): 273–277.

Reed, R. L.; Healy, R. N. 1977. Some physicochemical aspects of microemulsion flooding: a review, in D. O. Shah; R. S. Schechter, Eds. *Improved oil recovery by surfactant and polymer flooding*. New York: Academic Press Inc. 383–437.

Regan, P. E.; Arasteh, A. R. 1990. Lightweight aggregate foamed concrete, *The Structural Engineer* 68(9): 167–173.

Řezníčková, I.; Hoffmann, J.; Komárek, K. 2002. Biodegradation of technical mixtures of oxyethylenated aliphatic alcohols in an aqueous environment, *Chemosphere* 48: 83–87.

Rybinski, W.; Guckenbiehl, B.; Tesmann, H. 1998. Influence of co-surfactants on microemulsions with alkyl polyglycosides, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 142(2–3): 333–342.

Rosen, M. J.; Zhu, Z. H.; Hua, X. Y. 1992. Relationship of structure to properties of surfactants. 16. Linear decyldiphenylether sulfonates, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 69(1): 30–33.

Ross, J.; Miles, G. D. 1941. An apparatus for comparison of foaming properties of soaps and detergents, *Oil and Soap* 18: 99–102.

Rossignolo, J. A.; Agnesini, M. V. C. 2002. Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Research* 32(3): 329–334.

Salager, J. L. 2002. *Surfactants-types and uses*. FIRP booklet # 300A, version # 2. Merida: Universidad de Los Andes. 49 p.

Sarma, N. S. 2004. Etymology as an aid to understanding chemistry concepts, *Journal of Chemical Education* 81(10): 1437–1439.

Schott, H. 2001. Effect of inorganic additives on solutions of nonionic surfactants – XVI. Limiting cloud points of highly polyoxyethylated surfactants, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 186(1–2): 129–136.

Schramm, L. L.; Marangoni, D. G. 2000. Surfactants and their solutions: basic principles, in L. L. Schramm. *Surfactants: fundamentals and applications in the petroleum industry*. Cambridge: Cambridge University Press, 3–50.

Schubert, P. 1983. Shrinkage behaviour of aerated concrete, in F. H. Wittmann, Eds. *Autoclaved aerated concrete, moisture and properties*. Amsterdam: Elsevier, 207–217.

Schulze, L.; Lohmann, K. 1999. Physikochemie–beurteilung des zustands von waschund spulflüssigkeiten mit neuen messmethoden für oberflächen, *Tenside, Surfactants, Detergents* 36(6): 384–386.

Schwartz, A. M.; Perry, J. W.; Berch, J. 1977. *Surface active agents and detergents*, Vol. II. New York: R. E. Krieger Pub. Co. 869 p. ISBN 0882751573.

Simon, M. 1851. Recherches sur la capillarite, *Annales de Chimie et de Physique* 3(LXVII): 5–41.

Singh, A.; Van Hamme, J. D.; Ward, O. P. 2007. Surfactants in microbiology and biotechnology: part 2. application aspects, *Biotechnology Advances* 25(1): 99–121.

Sinica, M. 2001. *Dispersinių ir pluoštinių tarpų įtaka kompozitų iš porizuoto betono savybėms*: daktaro disertacijos santrauka. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 44 p.

Soederlind, E.; Stilbs, P. 1993. Chain conformation of ionic surfactants adsorbed on solid surfaces from carbon–13 NMR chemical shifts, *Langmuir* 9(7): 1678–1683.

Stoye, D.; Freitag, W. 1998. *Paints, coatings and solvents*. 2nd, completely revised edition. Weinheim: Wiley-VCH. 414 p. ISBN 3-527-28863-5.

Sussman, V. 1975. Lightweight plastic-aggregate concrete, *Journal of the American Concrete Institute* 72: 321–323.

Švenčianas, P.; Adomavičius, A. 2004. *Aiškinamasis šiluminės ir branduolinės technikos terminų žodynas*. Kaunas: Technologija. 228 p. ISBN 9955-09-740-X.

Tada, S.; Nakano, S.; 1983. Microstructural approach to properties of mist cellular concrete, in F. H. Wittmann, Eds. *Autoclaved aerated concrete, moisture and properties*. Amsterdam: Elsevier, 71–88.

Tadros, T. F. 2005. *Applied surfactants: principles and applications*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 654 p. ISBN 3-527-30629-9.

Taylor, W. H. 1969. *Concrete technology and practice*. 3rd ed. Sydney: Angus and Robertson. 667 p. ISBN 0207952264.

Takamura, K. 2006. *Surface tension and surfactant* [interaktyvus]. BASF Corporation [žiūrėta 2008 vasario 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.pavementpreservation.org/library/getfile.php?journal_id=739>.

Tam, C. T.; Lim, T. Y.; Lee, S. L. 1987. Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete, *Magazine of Concrete Research* 39: 12–18.

Tamura, T.; Takeuchi, Y.; Kaneko, Y. 1998. Influence of surfactant structure on the drainage of nonionic surfactant foam films, *Journal of Colloid and Interface Science* 206(1): 112–121.

Tanaka, M. 2005. Thermodynamics of solubility of surfactants in water, *Journal of Oleo Science* 54(5): 259–271.

Tanaka, M., *et al.* 1973. The effect of pressure on solubility of ionic surfactants in water, *Journal of Colloid and Interface Science* 44(3): 525–531.

Theander, K.; Pugh, R. J. 2001. The influence of pH and temperature on the equilibrium and dynamic surface tension of aqueous solutions of sodium oleate, *Journal of Colloid and Interface Science* 239(1): 209–216.

Tiberg, F.; Joesson, B.; Lindman, B. 1994. Ellipsometry studies of the self-assembly of nonionic surfactants at the silica-water interface: kinetic aspects, *Langmuir* 10(10): 3714–3722.

Tikalsky, P. J.; Pospisil, J.; MacDonald, W. 2004. A method for assessment of freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete, *Cement and Concrete Research* 34(5): 889–893.

University of Sydney: Key centre for polymers & colloids. 2005. *Surfactants* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2008 02 25]. Prieiga per internetą: <http://discovery.kcps.usyd.edu.au/9.5.5/9.5.5._introsurfactants.html>.

Vaitkus, S. 2007. *Trumpalaikėmis ir ilgalaikėmis apkrovomis gniuždomo polistireninio putplasčio stipruminių ir deformacinių savybių eksperimentiniai tyrimai*. Daktaro disertacija. Vilnius: VGTU Termoizoliacijos institutas. 138 p.

Valiukėnas, V.; Žilinskas, P. J. 2006. *Penkiakalbis aiškinamasis metrologijos terminų žodynas*. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas. 1163 p. ISBN 5-420-01568-4.

Valore, R. C., Jr. 1954. Cellular concretes: Part 1. Composition and methods of production, *Journal of the American Concrete Institute* 50(5): 773–796.

Valore, R. C., Jr. 1954. Cellular concretes: Part 2. Physical properties, *Journal of the American Concrete Institute* 25(10): 817–836.

Varadaraj, R., *et al.* 1994. Influence of surfactant structure on wettability modification of hydrophobic granular surfaces, *Journal of Colloid and Interface Science* 167(1): 207–210.

Visagie, M.; Kearsely, E. P. 2002. Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters, *Concrete/Beton* 101: 8–14.

Von Bahr, M. 2003. *Wetting and capillary flow of surfactant solutions and inks*. Akademisk avhandling för teknologie doktorsexamen. Lund University and Institute for Surface Chemistry. Lund: Lund University. 77 p.

Wang, H. R.; Chen, K. M. 2006. Preparation and surface active properties of biodegradable dextrin derivative surfactants, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 281(1–3): 190–193.

Wee, T. H., et al. 2006. Air-void systems of foamed concrete and its effect on mechanical properties, *Materials Journal of the American Concrete Institute* 103(1): 45–52.

Weigler, H.; Karl, S. 1980. Structural lightweight aggregate concrete with reduced density-lightweight aggregate foamed concrete, *The International Journal of Lightweight Concrete* 2: 101–104.

West, C. C.; Harwell, J. H. 1992. Surfactants and subsurface remediation. *Environmental Science and Technology* 26(12): 2324–2330.

Wilson, M. A.; Hoff, W. D.; Hall, C. 1991. Water movement in porous building materials-absorption from a small cylindrical cavity, *Building and Environment* 26(2): 143–152.

Winsor, P. A. 1954. *Solvent properties of amphiphilic compounds*. London: Butterworths Scientific Publications. 207 p.

Zhang, T., et al. 2001. Adsorptive behavior of surfactants on surface of Portland cement, *Cement and Concrete Research* 31(7): 1009–1015.

Žurauskas, R. 2002. *Technologinių veiksmų įtaka termoizoliacinio kompozito iš putų cementbetonio ir putų polistireno savybėms*. Daktaro disertacija. Vilnius: Termoizoliacijos institutas. 93 p.

Всероссийский федеральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский технологический институт строительной индустрии «ВНИИЖелезобетон». 1997 06 27. *Способ изготовления особо легких полистиролбетонных изделий*. Изобретатели: Д. Ф. Толорая, В. А. Рахманов, А. И. Козловский, В. Н. Россовский, Р. А. Козловский. Патент Российской Федерации 2082696, C1, бюллетень изобретений 18.

Всероссийский федеральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский технологический институт строительной индустрии «ВНИИЖелезобетон». 1997 06 27. *Способ изготовления экологически чистых легких полистиролбетонных изделий*. Изобретатели: А. И. Козловский, В. А. Рахманов, Д. Ф. Толорая, В. Н. Россовский, А. Е. Туранов, Р. А. Козловский. Патент Российской Федерации № 2082695, C1, бюллетень изобретений 18.

Всероссийский федеральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский технологический институт строительной индустрии «ВНИИЖелезобетон». 1997 12 07. *Способ изготовления полистирольного*

заполнителя для бетонной смеси и способ изготовления полистиролбетонных изделий. Изобретатели: В. А. Рахманов, А. И. Козловский, Д. Ф. Толорая, В. Н. Россовский, Р. А. Козловский. Патент Российской Федерации № 2100322, С1, бюллетень изобретений 36.

Куртц, В.; Шеллер, В. 1999. Оборудование для производства пенополистирола [Kurts, V.; Sheller, V. Polistireninio putplasčio gamybos įranga], *Строительные материалы* [Statybinės medžiagos] 9: 23–24.

Макарец, О. Н.; Ольхобская, А. А.; Черных, В. Ф. 1989. Разработка и исследование стенового материала на основе гранулированного пенополистирола [Makarec, O. N.; Olchobskaja, A. A.; Chernih, V. F. Sieninio elemento granuliuoto polistireninio putplasčio pagrindu sukūrimas ir tyrimas], *Известия вузов. Строительство и архитектура* 10: 59–62.

Мелихов, В. И.; Козловский, В. И.; Россовский, В. Н. 1997. Возможности получения особо легкого пенополистирольного заполнителя [Melihov, V. I.; Kozlovskij, V. I.; Rosovskij, V. N. Ypač lengvo polistireninio putplasčio užpildo gavimo galimybės], *Бетон и железобетон* 2: 20–22.

Павлов, В. А. 1973. *Пенополистирол* [Pavlov, V. Putų polistirolas]. Москва: Химия. 239 с.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Kligys, M.; Laukaitis, A.; Sinica, M.; Sezemanas, G. 2007. The influence of some surfactants on porous concrete properties, *Materials Science (Medžiagotyra)*, 13(4): 310–316. (INSPEC). ISSN 1392-1320.

Kligys, M.; Laukaitis, A.; Sinica, M.; Sezemanas, G.; Dranseika, N. 2008. Investigations into the fire hazard of a composite made from aerated concrete and crushed expanded polystyrene waste, *Mechanics of Composite Materials*, 44(2): 173–180. (SPRINGER). ISSN 0191-5665.

Sinica, M.; Laukaitis, A.; Sezemanas, G.; Kligys, M. 2008. Operational properties of a heat-insulation composite with expanded polystyrene crumbs, *Mechanics of Composite Materials*, 44(4): 415–424. (SPRINGER). ISSN 0191-5665.

Straipsniai, publikuoti tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagoje

Dranseika, N.; Kligys, M. 2006. Kompozito iš poringojo betono ir polistireno granulių degumo ir termoizoliacinių savybių tyrimai, iš *9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, vykusios 2006 m. kovo 29–31 d., Vilniuje, medžiagos. Vilnius: Technika, 20–25. ISBN 9955-28-047-6.

Kligys, M. 2006. Poringojo betono formavimo būdų paieška, iš *9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, vykusios 2006 m. kovo 29–31 d., Vilniuje, medžiagos. Vilnius: Technika, 38–43. ISBN 9955-28-047-6.

Kligys, M. 2007. Kompozito iš porizuoto betono ir trupintų putų polistireno taros atliekų gamybos technologija ir panaudojimo galimybės, iš *10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, vykusios 2007 m. kovo 29–30 d., Vilniuje, medžiagos. Vilnius: Technika, 67–72. ISBN 978-9955-28-163-4.

Laukaitis, A.; Sinica, M.; Mikulskis, D.; Kligys, M. 2006. The influence of the structure of light weight concrete on its properties, in *Internationale Baustoffagung „Ibausil 15“ held of September 20–23, 2006, Weimar*. Weimar: Bauhaus–Universität Weimar, Tagungsbericht–Band 2, 933–940. ISBN 3-00-018263-2.

Modestas KLIGYS

KOMPOZITINĖS MEDŽIAGOS IŠ PORINGOSIOS CEMENTO TEŠLOS
IR TRUPINTO POLISTIRENINIO PUTPLASČIO GAMYBOS TECHNOLOGIJA
IR SAVYBĖS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
medžiagų inžinerija (08T)

Modestas KLIGYS

PRODUCTION TECHNOLOGY AND PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL
MADE OUT OF POROUS CEMENT PASTE AND CRUSHED EXPANDED
POLYSTYRENE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (08T)

2009 09 14. 14,25 sp. l. Tiražas 20 egz.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto

leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius

<http://leidykla.vgtu.lt>

Spausdino UAB „Baltijos kopija“

Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius

<http://www.kopija.lt>