

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

EVALDAS ŠERELIS

YPAČ STIPRAUS BETONO STRUKTŪROS
SAVYBIŲ IR TECHNOLOGIJOS TYRIMAI

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

2016, Kaunas

UDK 666.972. (043.3)

Disertacija rengta 2011–2016 metais Kauno technologijos universiteto Statybos ir architektūros fakulteto Statybinių medžiagų katedroje.

Mokslinis vadovas:

prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, 02T).

Lietuvių kalbos redaktorė:

Rita Malikėnienė

Leidykla „Technologija“

© Evaldas Šerelis, 2016

ISBN 978-609-02-1200-4

Santrumpos:

YSB – ypač stiprus betonas;

V/C – vandens ir cemento santykis;

V_{ef}/C – efektyvus vandens (įvertinant superplastiklyje esančio vandens kiekį) ir cemento santykis;

V/R – vandens ir rišiklio santykis;

AMP – aktyvieji mineraliniai priedai.

Ypač stipraus betono sudėties projektavimo simboliai:

$P(d)$ – optimalus dalelių išsidėstymas pagal dydį;

d – dalelės dydis, mm;

d_{max} – didžiausias dalelės dydis, mm;

d_{min} – mažiausias dalelės dydis, mm;

d_i – dominuojančių sugrupuotų dalelių skersmuo, mm;

d_w – sugrupuotų dalelių skersmuo, dėl kurių bendras sistemos tūris padidėja, mm;

d_j – sugrupuotų nedomnuojančios klasės dalelių skersmuo, dėl kurių bendras sistemos tūris padidėja, mm;

q – dalelių praskyrimo koeficientas;

U – tuštumų santykis;

U_l – stambesnių dalelių tuštumų santykis;

U_s – smulkesnių dalelių tuštumų santykis;

U_i – dominuojančių dalelių tuštumų santykis;

U_{max} – didžiausių tuštumų skaičius;

ε – tuštumų skaičius;

ε_l – sugrupuotų stambesnių dalelių tuštumų skaičius (poringumas);

ε_s – sugrupuotų smulkių dalelių tuštumų skaičius;

α – santykinis mišinio tankis;

ϕ – dalelių tūrinė koncentracija;

ϕ_s – sugrupuotų smulkesnių dalelių tūrinė dalis;

ϕ_l – sugrupuotų stambesnių dalelių tūrinė dalis;

r_s – smulkesnių dalelių tūrinė dalis.

r_j – dalelių tūrinė dalis, dėl kurių bendras sistemos tūris padidėja;

$a_{i,j}$ – koeficientas, įvertinantis tuštumų skaičiaus padidėjimą;

w – skersmenų santykis tarp greta esančių skirtingo dydžio dalelių;

R_c – cemento klasė.

Ypač stipraus betono struktūros formavimo simboliai:

C_3S – trikalcio silikatas (alitas);

C_2S – dikalcio silikatas (belitas);

C_3A – trikalcio aluminatas;

C_4AF – tetrakalcio aliumoferitas;

x_{C_3S} – trikalcio silikato kiekis, %;

x_{C_2S} – dikalcio silikato kiekis, %;

x_{C_3A} – trikalcio aluminato kiekis, %;

x_{C_4AF} – tetrakalcio aliumoferito kiekis, %;

x_{CaO} – CaO kiekis, %;

$x_{Al_2O_3}$ – Al_2O_3 kiekis, %;

$x_{Fe_2O_3}$ – Fe_2O_3 kiekis, %;
 x_{SO_3} – SO_3 kiekis, %;
 x_{SiO_2} – SiO_2 kiekis, %;
 H – vanduo (H_2O);
 CH – kalcio hidroksidas (portlanditas);
 CSH – kalcio hidrosilikatai;
 \overline{CSH}_2 – gipsas;
 pH – vandenilio jonų (H^+) koncentracijos tirpale matas, rodantis tirpalo rūgštingumą ar šarmingumą;
 AFt – trisulfatinė etringito forma;
 AFm – monosulfohidroaluminatas;
 V_{gel} , V_{kap} , $V_{n.c.}$, V_{CH} , V_{AFm} , $V_{t.s.CSH}$ – gelio, kapiliarinių porų ir nesureagavusio cemento, kalcio hidroksido ir tankios struktūros kalcio hidrosilikatų tūris;
 α – cemento hidratacijos laipsnis;
 $\varphi_{h.n.}$, $\varphi_{n.c.}$, $\varphi_{n.v.}$, $\varphi_{h.s.}$, $\varphi_{k.p.}$ – hidratacijos naujadarų, nesureagavusio cemento, nesureagavusio vandens, cheminio susitraukimo ir kapiliarinio poringumo tūrinės koncentracijos;
 k – karbonizavusio cemento akmens kiekis, %;
 X – gelio ir tuštumų santykis;
 a – koeficientas, įvertinantis vidutinį betono gniuždymo stiprį (MPa);
 b – koeficientas, įvertinantis kreivės kitimą;
 p_i – tūrinė koncentracija (C_3S : $i = 1$; C_2S : $i = 2$; C_3A : $i = 3$ ir C_4AF : $i = 4$);
 a_i, b_i, c_i – konstantos;
 t – cemento hidratacijos laikas.

Dinaminės mišinio klampos skaičiavimas:

η – dinaminė mišinio klampa, Pa·s;
 g – laisvojo kritimo pagreitis;
 r – plieninio rutuliuko spindulys;
 ρ_{rut} – plieninio rutuliuko tankis;
 ρ_{sk} – betono mišinio tankis;
 R – plastikinio cilindro spindulys;
 l – pastovaus plieninio rutuliuko skendimo kelias, per laiką t .

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	7
PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS	9
IVADAS	14
Temos aktualumas	14
Tyrimų objektas	14
Darbo tikslas	15
Tyrimo metodika	15
Darbo uždaviniai	15
Mokslinis naujumas	15
Praktinė vertė	15
Ginamieji disertacijos teiginiai	15
Darbo apimtis	16
Darbo aprobavimas ir publikavimas	16
1. YPAČ STIPRAUS BETONO SUKŪRIMO RAIDA IR PRAKTINIS NAUDOJIMAS	17
1.1. Ypač stipraus betono mišinio komponentų parinkimas ir jų įtaka betono struktūrai bei savybėms	21
1.1.1. Kvarcinis smėlis	21
1.1.2. Maltas kvarcinis smėlis	22
1.1.3. Cementas	22
1.1.4. Silicio mikrodulkės	23
1.1.5. Maltas stiklas	25
1.1.6. Superplastiklis	27
1.1.7. Armuojantis pluoštas	29
1.2. YSB mišinio sudėties projektavimas	30
1.2.1. Optimalios granulometrinės kreivės parinkimas	31
1.2.2. Tankiausios sanglaudos modeliai	32
1.2.3. Schwanda tankiausios dalelių sanglaudos modelis	33
1.3. YSB struktūra ir jos formavimas	35
1.3.1. Klinkerio mineralų hidratacija	35
1.3.2. Portlandcemenčio hidratacijos kinetika	40
1.3.3. CSH struktūros modeliai	42
1.3.4. Pucolaninė reakcija	45
1.3.5. Šarminės korozijos tikimybė dėl malto stiklo	47
1.3.6. Pagrindinės YSB ilgalaikiškumo savybės	49
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	51
2. NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODIKA	52
2.1. Naudotos medžiagos	52
2.1.1. Portlandcementis	52
2.1.2. Betono mineraliniai mikroužpildai	53
2.1.3. Betono inertiniai mikroužpildai	54
2.1.4. Betono užpildai	54
2.1.5. Dispersinis betono armavimas	56
2.1.6. Cheminiai priedai	56
2.1.7. Pagalbinės priemonės	56

2.2. Tyrimų metodika	56
3. CEMENTO AKMENS STRUKTŪROS FORMAVIMAS IR STRUKTŪROS ANALIZĖ	61
3.1. Cemento akmens struktūros formavimas	61
3.2. Cemento akmens struktūros analizė	65
3.2.1. Aktyviųjų mineralinių priedų cheminė analizė ir pucolaninis aktyvumas	65
3.2.2. Vandens ir cemento santykio įtaka	67
3.2.3. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių kiekio įtaka cemento akmens mikrostruktūrai	72
3.2.4. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui	78
3.3. Ypač stipraus betono struktūros sudarymo principai	79
3.3.1. Cemento kiekio parinkimas	80
3.3.2. Superplastiklio kiekio parinkimas	81
3.3.3. Silicio mikrodulkių kiekio parinkimas	84
3.3.4. Racionalios betono mišinio granulometrinės sudėties parinkimas	90
3.3.5. Ypač stipraus betono sudėties skaičiavimo metodika	93
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	95
4. FIZIKINIŲ IR MECHANINIŲ SAVYBIŲ ĮTAKA YPAČ STIPRAUS BETONO STRUKTŪROS PARAMETRAMS	96
4.1. Betono stiprumo savybių įtaka įvairiems struktūros parametrams	96
4.2. Ypač stipraus betono savybės	99
4.2.1. Dinaminė mišinio klampa ir pasklidimas	99
4.2.2. Ypač stipraus betono fizikinės ir mechaninės savybės	102
4.2.3. Betono mišinio paruošimo įtaka gniuždymo stipriui	106
4.3. Ypač stipraus betono ilgalaikiškumas	107
4.3.1. Betono atsparumas cikliškam tūriniam šaldymo ir atšildymo poveikiui	107
4.3.2. Betono atsparumas cikliškam paviršiniam šaldymo ir atšildymo poveikiui	110
4.3.3. Betono fizikinės ir mechaninės savybės po ilgo kietėjimo laiko	112
4.4. Ypač stipraus betono mišinių technologijos ruošimo ypatumai panaudojant pramoninę maišyklę	116
4.5. Ketvirtąjo skyriaus išvados	119
BENDROSIOS IŠVADOS	120
LITERATŪROS SĄRAŠAS	121
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	130

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Svarbiausi pasiekimai betono technologijoje (Naaman, 2012)	18
1.2 lentelė. Įprastinio, stipriojo ir ypač stipraus betono mišinio sudėtys ir pagrindinės fizikinės/mechaninės savybės (Dugat, 1996; Castellote, 2003; Droll, 2004).....	21
1.3 lentelė. Pagrindiniai YSB mišinyje naudojami inertiniai užpildai ir jų savybės (Naaman, 2012)	22
1.4 lentelė. Pagrindinių klinkerio mineralų savybės (Tailor, 1997; Jenings, 2011).....	23
1.5 lentelė. Pagrindinės cemento ir aktyviųjų mineralinių mikroužpildų fizikinės/cheminės savybės (König, 2001; Droll, 2003)	24
1.6 lentelė. Pagrindinių pramonėje gaminamų stiklų rūšys ir jų cheminės sudėtys (Shi, 2007).....	25
1.7 lentelė. Jėgos, pasireiškiančios suspensinėje sistemoje (Cartuxo, 2015)	27
1.9 lentelė. Gipso kiekio įtaka C_3A hidratacijos naujųjų susidarymui (Taylor, 2014)	39
2.1 lentelė. Portlandcemenčio, silicio mikrodulkių ir malto stiklo fizikinės ir mechaninės savybės	52
2.2 lentelė. Portlandcemenčio, silicio mikrodulkių ir malto stiklo cheminė ir mineralinė sudėtis	53
2.3 lentelė. Malto kvarcinio smėlio, malto granito ir smėlio fizikinės bei mechaninės savybės	53
2.4 lentelė. Malto kvarcinio smėlio, malto granito ir smėlio cheminė sudėtis	54
2.5 lentelė. UAB „Quarzwerke Gruppe“ įmonės 0/0,5 mm frakcijos kvarcinio smėlio granulimetrinė sudėtis	55
2.6 lentelė. AB „Anykščių kvarcas“ įmonės 0/1 mm frakcijos kvarcinio smėlio granulimetrinė sudėtis	55
2.7 lentelė. AB „Anykščių kvarcas“ įmonės 0/1.6 mm frakcijos kvarcinio smėlio granulimetrinė sudėtis	55
2.8 lentelė. Tyrimams naudotų superplastiklių fizikinės ir cheminės savybės	56
2.9 lentelė. Tyrimams naudotų pagalbinių priemonių fizikinės savybės	56
2.10 lentelė. Betono mišinio maišymo seka, naudojant vibracinę ir vibracinę greitaveikę maišyklės	57
2.11 lentelė. Betono mišinio maišymo seka, naudojant vakuuminę greitaveikę maišyklė	57
3.1 lentelė. Ypač stipraus betono sudėtys	61
3.2 lentelė. Hidratacijos naujųjų (ϕ_{hp}), nesureagavusio rišiklio (ϕ_{nr}), nesureagavusio vandens (ϕ_v), susitraukimo deformacijų (ϕ_s), kapiliarinio poringumo (P_a) ir C-S-H (ϕ_{C-S-H}) tūrinės koncentracijos	65
3.3 lentelė. Ypač stipraus betono sudėtys, kai maltas kvarcinis smėlis buvo keičiamas maltu stiklu ($V/C=0,25$).....	72
3.4 lentelė. Ypač stipraus betono sudėtys, kai silicio mikrodulkės buvo keičiamos maltu stiklu ($V/C=0,25$).....	73
3.5 lentelė. Silicio elemento kiekis cemento akmenyje su skirtingu aktyvaus mineralinio priedo kiekiu (reikšmės skliausteliuose prieš hidratacijos procesą)	78
3.6 lentelė. Cemento, silicio mikrodulkių ir malto stiklo hidratacijos laipsnis ir vidutinis C-S-H grandinės ilgis	78
3.7 lentelė. Preliminarios ypač stipraus betono mišinio sudėtys	81
3.8 lentelė. Ypač stipraus betono mišinio sudėtys	82

3.9 lentelė. Superplastiklių įtaka cemento tešlos kietėjimo procesui	83
3.10 lentelė. Ypač stipraus betono mišinio sudėtys	85
3.11 lentelė. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka cemento tešlos kietėjimo procesui	85
3.12 lentelė. Eksperimentinių tyrimu metu taikyti kietinimo režimai	86
3.13 lentelė. Silicio mikrodulkių įtaka betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms ...	88
3.14 lentelė. Cemento akmens su skirtingu silicio mikrodulkių kiekybinės rentgenografinės analizės rezultatai.....	89
3.15 lentelė. Ypač stipraus betono mišinio sudėtys	90
3.16 lentelė. Apibendrintos ypač stipraus betono mišinio sudėtys.....	93
4.1 lentelė. Rekomenduojamos ypač stipraus betono mišinio sudėtys.....	116
4.2 lentelė. Rekomenduojama ypač stipraus betono mišinio sudėtis	117
4.3 lentelė. Patikslinta YSB mišinio maišymo procedūra naudojant pramoninę maišyklę	117
4.4 lentelė. YSB betono fizikinės ir mechaninės savybės.....	117

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Betono technologijos vystymasis ir svarbiausi pasiekimai (sudaryta autoriaus)	17
1.2 pav. Ypač stipraus betono naudojimas konstrukcijose (sudaryta autoriaus)	19
1.3 pav. Ypač stipraus betono naudojimas architektūroje (sudaryta autoriaus)	20
1.4 pav. Silicio mikrodulkių įtaka betono mikrostruktūrai (Vogt, 2010)	23
1.5 pav. Betono mikrostruktūra: a – įprastinio ir b – ypač stipraus betono (Schmidt, 2007)	23
1.6 pav. Aglomeravusi silicio mikrodulkė, sukėlusį šarminę betono koroziją (Juengera, 2004)	26
1.7 pav. Skiedinio struktūra, kuriame panaudotas maltas stiklas. Natrio silikato gelis susiformavo tik stiklo įtrūkimo vietose (Shafaatian, 2013)	26
1.8 pav. Dvigubo elektrinio sluoksnio lauko modelis (Talero, 2013)	27
1.9 pav. Zeta potencialo schema	27
1.10 pav. Polikarboksilato eterio su skirtingais koopolimerais įtaka cemento ir silicio mikrodulkių dispergavimui (Schröfl, 2012)	28
1.11 pav. Pluošto formos įtaka irimo pobūdžiui (Park, 2012)	29
1.12 pav. Išilginių ir skersinių plyšių susiformavimas naudojant plieninę armatūrą (Fehling, 2012)	29
1.13 pav. Monodispersinių sferinių dalelių išsidėstymas kubo (a) ir tetraedro (b) formoje (sudaryta autoriaus)	30
1.14 pav. Dalelių pagal dydį išsidėstymas skirtingais struktūros lygiais (sudaryta autoriaus)	31
1.15 pav. Optimalus dalelių pagal dydį pasiskirstymas pagal Fuller, Andreasen ir Funk metodą (sudaryta autoriaus)	32
1.16 pav. Koeficiento $a_{i,j}$ įvertinimas, priklausomai nuo dalelių tarpusavio sąveikos (Schwanda, 1966)	34
1.17 pav. Pagrindiniai struktūros skirtumai tarp įprastinės sudėties ir ypč stipraus betono (sudaryta autoriaus)	36
1.18 pav. C_3S minerale susiformavę išoriniai ir vidiniai CSH produktai ($V/C = 0,40$; kietinimo trukmė 8 metai, temperatūra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Richardson, 2004)	38
1.19 pav. $\beta\text{-}C_2S$ minerale susiformavę tankūs išoriniai CSH produktai ($V/C = 0,40$; kietinimo trukmė 3 mėnesiai, temperatūra	38
1.20 pav. Portlandcemenčio hidratacijos metu susiformavę CH kristalai augdami suformuoja cementinėje matricoje mikroplyšius ($V/C = 0,40$) (Slamečka, 2002)	38
1.21 pav. CH kristalai, tolygiai pasiskirstę cementinėje matricoje ($V/C = 0,25$) (Slamečka, 2002)	38
1.22 pav. Šarminės aplinkos įtaka etringito kristalų dydžiui (Stark, 2011)	40
1.23 pav. Etringito kristalai cemento sistemoje: a – be superplastiklio; b – su superplastikliu (Plank, 2007)	40
1.24 pav. Portlandcemenčio hidratacijos kinetika (sudaryta autoriaus)	41
1.25 pav. Hidratacijos naujadarai po 1 h: a – kai be priedų; b – su 8 % SiO_2 nano dulkių ($V/C = 0,30$) (Sobolev, 2006)	41
1.26 pav. Cemento akmens ($V/C = 0,22$) mikrostruktūros vystymasis: a – po 8 h; b – 18 h	42
1.27 pav. CSH struktūros modeliai: a – Powers; b – Feldman; c – Jenings modeliai	43

1.28 pav. Aktyviųjų mineralinių priedų pucolaninis ir hidraulinis poveikis.....	46
1.29 pav. Pucolaninės reakcijos ir šarminės korozijos susidarymo schema (sudaryta autoriaus)	47
1.30 pav. Stiklo dalelių dydžio įtaka skiedinio ($V/C = 0,50$) išsiplėtimo deformacijoms (Shayan, 2002).....	48
1.31 pav. CSH nanostruktūra su įsiterpusiomis priemaišomis P: Na^+ , K^+ (Beaudoin, 2009)	48
2.1 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoto portlandcemenčio diferencialinis pasiskirstymas pagal skersmenis	52
2.2 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoto portlandcemenčio integralinis pasiskirstymas pagal skersmenis	52
2.3 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų mineralinių mikroužpildų diferencialinis pasiskirstymas pagal skersmenis	54
2.4 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų mineralinių mikroužpildų integralinis pasiskirstymas pagal skersmenis	54
2.5 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų inertinių mikroužpildų diferencialinis pasiskirstymas pagal skersmenis	55
2.6 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų inertinių mikroužpildų integralinis pasiskirstymas pagal skersmenis	55
3.1 pav. Vandens ir rišiklio santykio įtaka hydratacijos laipsniui, kai cemento akmenyje panaudotas skirtingas kiekis aktyviojo mikroužpildo.....	62
3.2 pav. Pagal modelį susidariusių hydratacijos produktų (ϕ_{hp}), nesureagavusio cemento (ϕ_{nc}), likusio vandens (ϕ_v) ir susitraukimo (ϕ_s) dėl cheminių veiksnių tūrinių koncentracijų priklausomybė nuo V/R santykio ir maksimalaus hydratacijos laipsnio.....	62
3.3 pav. V/R santykio įtaka hydratacijos produktų (ϕ_{hp}), nesureagavusio cemento (ϕ_{nr}), likusio vandens (ϕ_v) ir susitraukimo (ϕ_s) dėl cheminių veiksnių tūrinių koncentracijų, kai cemento akmenyje nepanaudota aktyviojo mineralinio priedo ($C735+0SiO_2+0MS+5\%SP$).....	63
3.4 pav. V/R santykio įtaka hydratacijos produktų (ϕ_{hp}), nesureagavusio cemento (ϕ_{nr}), likusio vandens (ϕ_v) ir susitraukimo (ϕ_s) dėl cheminių veiksnių tūrinių koncentracijų, kai cemento akmenyje panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas ($C735+99SiO_2+412MS+5\%SP$).....	63
3.5 pav. Vandens ir rišiklio santykio įtaka kapiliariniam poringumui, kai cemento akmenyje panaudotas skirtingas kiekis aktyviojo mikroužpildo	64
3.6 pav. Vandens ir rišiklio santykio įtaka tūrinei C-S-H koncentracijai, kai cemento akmenyje panaudotas skirtingas kiekis aktyviojo mikroužpildo	64
3.7 pav. Nehidratavusio cemento, silicio mikrodulkių ir malto stiklo rentgenogramos..	66
3.8 pav. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių savitojo paviršiaus įtaka surišto $Ca(OH)_2$ kiekiui	67
3.9 pav. Cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu rentgenograma ($V/C = 0,25$).....	68
3.10 pav. Cemento akmens be aktyviojo mineralinio priedo ($C735+0SiO_2+0MS+5\%SP$) termograma ($V/C = 0,25$)	69
3.11 pav. Cemento akmens su silicio mikrodulkėmis ($C735+99SiO_2+0MS+5\%SP$) termograma ($V/C=0,25$)	69
3.12 pav. Cemento akmens su maltu stiklu ($C735+0SiO_2+511MS+5\%SP$) termograma ($V/C = 0,25$).....	70

3.13 pav. Cemento akmens su maltu stiklu ($C735+99SiO_2+412MS+5\%SP$) termograma ($V/C = 0,25$)	70
3.14 pav. Cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu DSC analizės kreivės ($V/C = 0,25$)	71
3.15 pav. Cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu TG analizės kreivės ($V/C = 0,25$)	71
3.16 pav. V/C santyko įtaka susidariusiam CH kiekiui.....	72
3.17 pav. Cemento akmens su skirtingu malto stiklo kiekiu rentgenograma ($V/C = 0,25$)	73
3.18 pav. Malto stiklo kiekio įtaka nehidratuotiems klinkerio mineralams ($V/C = 0,25$)	74
3.19 pav. Malto stiklo kiekio įtaka hidratacijos produktams ($V/C = 0,25$).....	74
3.20 pav. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių kiekio įtaka nehidratuotiems klinkerio mineralams ($V/C = 0,25$)	75
3.21 pav. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių kiekio įtaka hidratacijos produktams ($V/C = 0,25$).....	75
3.22 pav. Cemento akmens su skirtingu malto stiklo kiekiu rentgenografinės analizės rezultatai ($V/C = 0,25$).....	76
3.23 pav. Cemento akmens su skirtingu malto stiklo kiekiu ^{29}Si MAS magnetinio branduolių rezonanso spektro interpretacija, kai naudotas: a) maltas stiklas b) cemento akmuo ($C735+99SiO_2+0MS+4,17\%SP$) su silicio mikrodulkėmis.....	77
3.24 pav. Cemento akmens su skirtingu malto stiklo kiekiu ^{29}Si MAS magnetinio branduolių rezonanso spektrograma ($V/C = 0,25$)	77
3.25 pav. V/R santykio įtaka gniuždymo stipriui.....	80
3.26 pav. Cemento kiekio įtaka gniuždymo stipriui ($V/C = 0,57$).....	81
3.27 pav. Dinaminės mišinio klampos ir mišinio pasklidimo įtaka superplastiklio tipui.....	82
3.28 pav. Superplastiklių (G623 ir D190) įtaka cemento tešlos rišimosi procesui	83
3.29 pav. Modifikuoto superplastiklio įtaka cemento tešlos rišimosi procesui.....	83
3.30 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka mišinio pasklidimui ir dinaminei klampai ($V/R = 0,30$)	86
3.31 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka cemento tešlos rišimosi procesui ($V/R = 0,30$)	86
3.32 pav. Cemento akmens su skirtingu silicio mikrodulkių kiekiu rentgenograma	87
3.33 pav. Cemento akmens su skirtingu silicio mikrodulkių kiekiu hidratai, kai bandiniai nebuvo termiškai apdoroti	87
3.34 pav. Cemento akmens su skirtingu silicio mikrodulkių kiekiu hidratai, kai bandiniai buvo termiškai apdoroti esant $80\text{ }^{\circ}C$ ($3+18+5\text{ h}$).....	88
3.35 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka betono tankiui	90
3.36 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka betono gniuždymo stipriui	90
3.37 pav. Cemento kiekio įtaka santykiniam mišinio tankiui	91
3.38 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka santykiniam mišinio tankiui.....	91
3.39 pav. Optimali mišinio granulimetrinė kreivė, kai naudotos lietuviškos medžiagos ir didžiausias dalelės dydis – $1600\text{ }\mu m$	91
3.40 pav. Optimali mišinio granulimetrinė kreivė, kai naudotos vokiškos medžiagos ir didžiausias dalelės dydis – $500\text{ }\mu m$	92
3.41 pav. Malto kvarcinio smėlio įtaka santykiniam mišinio tankiui	92
4.1 pav. Gelio ir tuštumų santykio įtaka betono gniuždymo stipriui	96

4.2 pav. Hidratacijos laipsnio įtaka betono prognozuojamam gniuždymo stipriui, esant skirtingam V/R santykiui.....	96
4.3 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai cemento akmenyje nepanaudota jokio aktyviojo mineralinio priedo (C735+0SiO ₂ +0MS+5%SP).....	97
4.4 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai cemento akmenyje panaudotos silicio mikrodulkės (C735+99SiO ₂ +0MS+5%SP)	97
4.5 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai cemento akmenyje panaudotas maltas stiklas (C735+0SiO ₂ +511MS+5%SP)	98
4.6 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai cemento akmenyje panaudotos maltas stiklas ir silicio mikrodulkės (C735+99SiO ₂ +412MS+5%SP)	98
4.7 pav. V/C santykio įtaka betono mišinio pasklidimui	99
4.8 pav. V/C santykio įtaka betono mišinio dinaminei klampai	99
4.9 pav. Malto stiklo kiekio įtaka ypač stipraus betono mišinio pasklidimui (V/C=0,25)	100
4.10 pav. Malto stiklo kiekio įtaka ypatingai stipraus betono lenkimo stipriui (V/C=0,25)	100
4.11 pav. V/C santykio įtaka sukietėjusio betono tankiui: T-20, kai bandiniai 28 paras buvo kietinti 20 °C temperatūros vandenyje; T-80, kai bandiniai po išformavimo buvo termiškai apdoroti (terminis režimas 3+16+5 h) 80 °C temperatūroje, o likusį laiką laikyti 20 °C temperatūros vandenyje	100
4.12 pav. V/C santykio įtaka betono gniuždymo stipriui: T-20, kai bandiniai 28 paras buvo kietinti 20 °C temperatūros vandenyje; T-80, kai bandiniai po išformavimo buvo termiškai apdoroti (terminis režimas 3+16+5 h) 80 °C temperatūroje, o likusį laiką laikyti 20 °C temperatūros vandenyje	101
4.13 pav. Malto stiklo kiekio įtaka ypač stipraus betono gniuždymo stipriui (V/C = 0,25)	103
4.14 pav. Plieninio pluošto kiekio įtaka betono lenkimo ir gniuždymo stipriui (V/C = 0,27).....	103
4.15 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo ir lenkimo stipriui (f_{gn}/f_i).....	104
4.16 pav. Plieninio pluošto įtaka betono gniuždymo ir lenkimo santykiui (f_{gn}/f_i), kai (V/C = 0,27)	104
4.17 pav. Mastelio faktoriaus dydžio įtaka ypač stipraus betono gniuždymo stipriui ..	105
4.18 pav. Plieninio pluošto kiekio įtaka ypač stipraus betono susitraukimo deformacijoms (V/C = 0,27).....	105
4.19 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai naudojama greitaveikė vibracinė ir vakuuminė greitaveikė maišyklės	106
4.20 pav. Ultragarso sklaidimo greičio pokytis prieš ir po 200 tūrinio šaldymo bei atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale (V/C=0,25).....	108
4.21 pav. Dinaminio tamprumo modulio pokytis prieš ir po 200 tūrinio šaldymo bei atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale (V/C=0,25).....	108
4.22 pav. Gniuždymo stiprio pokytis prieš ir po 200 tūrinio šaldymo bei atšildymo ciklą	109
4.23 pav. Tirtų bandinių paviršius: a – kai nėra įtrūkimų; b – padidinus 50×; c – kai yra įtrūkimų ir d – padidinus 50× (V/C = 0,25).....	109
4.24 pav. Ultragarso sklaidimo greičio pokytis prieš ir po 40 paviršinio šaldymo bei atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale (V/C = 0,22).....	110

4.25 pav. Tiesinė funkcinė priklausomybė tarp masės nuostolių ir ultragarso sklaidimo greičio ($V/C = 0,22$)	110
4.26 pav. Dinaminio tamprumo modulio pokytis prieš ir po 40 paviršinio šaldymo bei atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale ($V/C = 0,22$).....	111
4.27 pav. Tiesinė funkcinė priklausomybė tarp masės nuostolių ir dinaminio tamprumo modulio ($V/C = 0,22$)	111
4.28 pav. Gniuždymo stiprio pokytis prieš ir po 40 paviršinio šaldymo bei atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale ($V/C = 0,22$).....	111
4.29 pav. Tiesinė funkcinė priklausomybė tarp masės nuostolių ir gniuždymo stiprio ($V/C = 0,22$)	111
4.30 pav. Tirtų bandinių paviršius: a – be padidavimo; b – padidinus $50\times$ ($V/C = 0,22$)	112
4.31 pav. Betono integralinis porų pagal skersmenis pasiskirstymas, kai savybės nustatytos po 28 parų ($V/C = 0,25$)	113
4.32 pav. Betono integralinis porų pagal skersmenis pasiskirstymas, kai savybės nustatytos po 1115 parų ($V/C=0,25$)	113
4.33 pav. Betono diferencialinis porų pagal skersmenis pasiskirstymas, kai savybės nustatytos po 28 parų ($V/C = 0,25$)	114
4.34 pav. Betono diferencialinis porų pagal skersmenis pasiskirstymas, kai savybės nustatytos po 1115 parų ($V/C = 0,25$)	114
4.35 pav. Malto stiklo kiekio įtaka betono susitraukimo deformacijoms, taikant pagreitintą šarminės korozijos nustatymo metodą (deformacijos pradėtos matuoti po bandinių išformavimo)	115
4.36 pav. Malto stiklo kiekio įtaka betono susitraukimo deformacijoms, taikant pagreitintą šarminės korozijos nustatymo metodą (deformacijos pradėtos matuoti po 1115 parų).....	115
4.37 pav. Betono gniuždymo stiprio pokytis prieš ir po pagreitinto šarminės korozijos nustatymo metodo	116
4.38 pav. Betono gniuždymo stiprio pokytis po 28 parų ir po 1115 parų	116
4.39 pav. Rekomenduojama ypač stipraus betono mišinio granulimetrinė kreivė.....	118

IVADAS

Temos aktualumas

Šiuo metu terminas *ypač stiprus betonas* nėra apibrėžtas Lietuvos, Europos Sąjungos ar kitų pasaulio valstybių techniniuose, teisiniuose dokumentuose, reglamentuose ar projektavimo normose. Pagal LST EN 206:2014 ypač stiprus betonas galėtų būti laikomas toks, kurio gniuždymo stipris būtų didesnis kaip 100 MPa. Tačiau šis apibrėžimas nėra tikslus ir teisingas, pasaulinėje praktikoje šio betono gniuždymo stipris gali kisti nuo 150 MPa iki 250 MPa. Galbūt netolimoje ateityje atsiras techninis reglamentas ar klasifikacija, kuri tiksliau apibrėš šį betoną.

Ypač stiprus betonas savo struktūra ir savybėmis labai skiriasi nuo įprastinės sudėties betono, todėl su juo yra susiję daugybė neišspręstų problemų. Dėl didelio panaudoto cemento kiekio ir mažo V/C santykio lieka daugiau kaip 50 % nesureagavusio klinkerio mineralų. Nesureagavusios klinkerio dalelės yra brangus ir reaktyvusis mikroužpildas, didinantis sukietėjusio betono tamprumo modulį ir eksploatuojant galintis užtaisyti konstrukcijoje atsiradusius mikroįtrūkius (iki $<40\ \mu\text{m}$), ir labai pabrangina mišinio savikainą. Mišinyje taip pat panaudotas labai didelis silicio mikrodulkių (iki 30 % cemento masės) kiekis. Tyrimais nustatyta, kad 18 % silicio mikrodulkių (pagal masę) yra tas kiekis, kuriam esant sureaguoja visas cemento hidratacijos metu susidaręs portlanditas. Nors sumažėjęs portlandito kiekis turi teigiamą įtaką susidariusiai betono struktūrai ir mechaninėms savybėms, tačiau dėl nepakankamos šarminės aplinkos gali prasidėti plieninės armatūros korozija. Didesnis nei 18 % (cemento masės) silicio mikrodulkių kiekis paprastai naudojamas siekiant pagerinti mišinio granulimetrinę sudėtį ir gauti tankesnės struktūros dalelių sanglaudą. Nors silicio mikrodulkės yra labai svarbi ypač stipraus betono mišinio sudedamoji dalis, ši gamybinė atlieka Lietuvoje nėra išgaunama, jos reikia atsivežti iš kaimyninių šalių. Vienas iš aktyviųjų mineralinių priedų, kurio yra gausu Lietuvoje ir galėtų būti panaudotas ypač stiprių betonų gamyboje, yra stiklo atliekos.

Aplinkos ministerijos duomenimis (www.am.lt), Lietuvoje per metus susidaro apie 100 tūkst. tonų stiklo atliekų (butelių, stiklainių, duženų ir kt.). Į antrinį perdirbimą iš jų patenka maždaug 25–29 %, o likęs kiekis sumetamas į sąvartynus ir ilgam užteršia gamtą. Pagal struktūrą stiklas yra kietoji amorfinės struktūros medžiaga, paprastai susidedanti iš didelio kiekio amorfinės struktūros SiO_2 ($\geq 70\%$), Na_2O ($\geq 12\%$) ir CaO ($\geq 5\%$) (Kou, 2012). Būdamas amorfinės struktūros ir turėdamas didelį kiekį amorfinės struktūros silicio dioksido, maltas stiklas galėtų būti puiki pucolaninė medžiaga ir panaudota ypač stiprių betonų gamyboje. Tačiau maltas stiklas turi didelį kiekį Na_2O , esant tam tikriems reaktyviesiems betono užpildams (opalui, chalcedonui, silicio smiltainiui, titnagai, obsidianui), gali sukelti šarminę betono koroziją (Ravindra, 2014). Todėl būtini išsamesni tyrimai, norint nustatyti malto stiklo naudojimo galimybes ypač stiprių betonų gamyboje.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – ypač stiprus betonas su malto stiklo užpildu.

Darbo tikslas

Teoriškai ir eksperimentiškai nustatyti bendruosius ypač stipraus betono struktūros formavimo principus, fizikinių ir mechaninių savybių kaitos dėsningumus, parengti metodiką YSB mišinių sudėties projektuoti ir savybėms prognozuoti.

Tyrimo metodika

Cemento mineralų hidratacijos parametrai tirti pusiau adiabatinio kalorimetru, cemento akmens struktūros parametrai tirti rentgeno, termografinės analizės ir ^{29}Si branduolių magnetinio rezonanso metodais. Šviežio betono konsistencija nustatyta matuojant mišinio pasklidimą ir dinaminio mišinio klampą. Sukietėjusio betono struktūra tirta gyvsidabrio porometrijos, fluorescenciniu, dinaminio tamprumo modulio ir ultragarsinio tyrimo metodais. Betono susitraukimo deformacijos nustatytos laboratoriniu dilatometru. Betono ilgalaikiškumas patikrintas taikant pagreintą šarminės korozijos, turinį ir paviršinį šaldymo ir atšildymo 3 % NaCl tirpale metodus.

Darbo uždaviniai

1. Ištirti silicio mikrodulkių ir malto stiklo priedų įtaką cemento akmens struktūrai ir savybėms.
2. Pritaikyti Brouwers ir Amen matematinius modelius struktūros ir stiprumo savybėms prognozuoti bei sukurti ypač stipraus betono mišinio sudėties projektavimo metodiką.
3. Ištirti malto stiklo priedo įtaką portlandcemenčio hidratacijos procesui.
4. Tyrimo rezultatus patikrinti gamybos sąlygomis ir parengti rekomendacijas ypač stipraus betono gamybai

Mokslinis naujumas

Nustatyta, kad maltas stiklo priedas cemento hidratacijos metu dalyvauja pucolaninėje reakcijoje, kurios metu susiformuoja antriniai mažo bazingumo kalcio hidrosilikatai. Šių junginių susidarymas kietėjančioje sistemoje didina cemento akmens gniuždymo stiprį. Taip pat malto stiklo priedas spartina klinkerio mineralų hidrataciją.

Praktinė vertė

Sukurta ypač stipraus betono mišinio sudėties projektavimo metodika, esant mažam V/C santykiui. Pasiūlytas malto stiklo ir kitų dispersinių priedų paruošimo būdas. Sukurtas ypač stiprus (230 MPa gniuždymo stiprumo) ir ypač atsparus šalčiui betonas, naudojant maltas stiklo atliekas kaip aktyvųjį mikroužpildą.

Ginamieji disertacijos teiginiai

1. Malto stiklo priedo naudojimas teigiamai veikia portlandcemenčio hidratacijos mechanizmą ir jos kinetinius parametrus.

2. Malto stiklo priedas dalyvauja pucolaninėje reakcijoje, kurios metu hidratuotoje cemento sistemoje susidaro papildomi kalcio hidrosilikatai. Šių junginių susidarymas kietėjančioje sistemoje didina cemento akmens gniuždymo stiprį.

Darbo apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, 4 skyriai, bendrosios išvados, 137 literatūros šaltinių sąrašas, autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas. Darbo apimtis – 131 puslapis, kuriuose pateikta 40 lentelių ir 117 paveikslų.

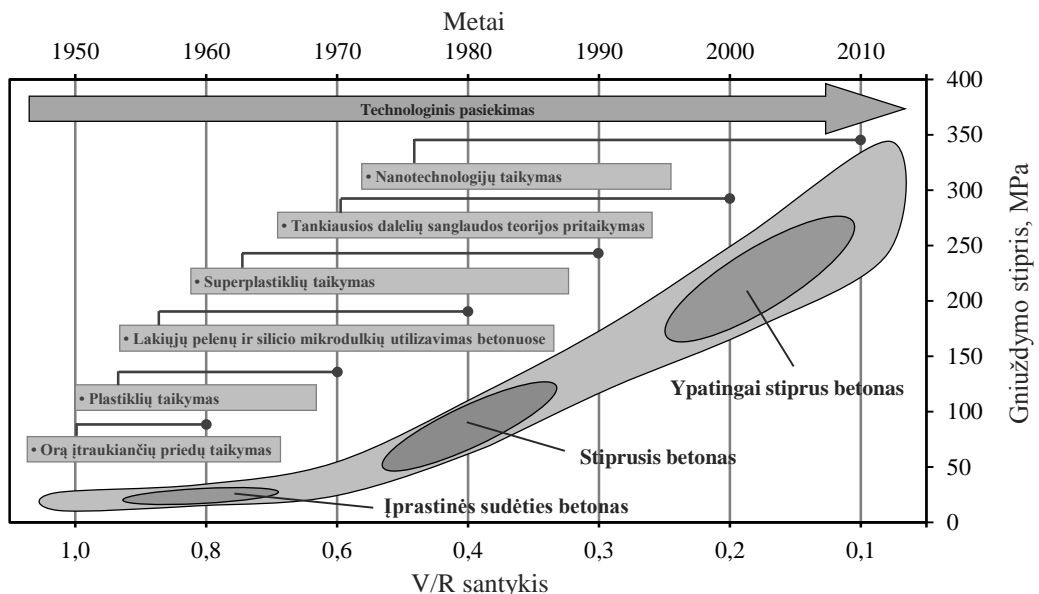
Darbo aprobavimas ir publikavimas

Disertacijos tema paskelbta 11 mokslinių publikacijų: 2 straipsniai „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą, 1 straipsnis „ISI Web of Science“ leidinyje, neturinčiame citavimo indekso, 2 straipsniai tarptautinių duomenų bazių leidiniuose, 3 straipsniai kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose, 3 straipsniai nerecenzuojamuose ir mokslo populiarinimo leidiniuose.

1. YPAČ STIPRAUS BETONO SUKŪRIMO RAIDA IR PRAKTINIS NAUDOJIMAS

Betonas yra santykinai pigi, technologiška ir ilgalaikė statybinė medžiaga, kuri labai plačiai pritaikoma ne tik įvairių inžinerinių statinių ir gyvenamųjų pastatų statyboje, bet ir karinėje pramonėje. Šiuo metu sukurta įvairiausių betono modifikacijų (lengvasis betonas, savaime sutankėjantis betonas, ugniai atsparus betonas, ypač stiprus betonas ir t. t.), kurios yra plačiai tyrinėjamos ir tobulinamos net ir šiomis dienomis. Tačiau šiuolaikinis betonas labai skiriasi technologinėmis, mechaninėmis ir ilgalaikiškumo savybėmis nuo betono, kuris buvo naudojamas prieš 100 metų.

Betonas kaip statybinė medžiaga ir tyrimo objektas didžiausio įvairiausių mokslininkų dėmesio sulaukė 1930–1940 m., kai po Pirmojo pasaulinio karo pramonė vystėsi sparčiai. Tačiau tuo metu didžiausias betono gniuždymo stipris siekė apie 15–20 MPa. Iki 1960 m. šio gniuždymo stiprio niekaip nepavyko padidinti. Atsiradus plastikliams (apie 1970 m.), betono gniuždymo stipris padidėjo daugiau kaip tris kartus. Taip pat tuo laikotarpiu pirmą kartą pavartota *stipriojo betono* sąvoka. Tačiau plastikliai dar nebuvo pakankamai efektyvūs, kad betonuose būtų buvę galima mažinti V/C santykį. Todėl vyko tolesnis cheminių priedų tyrimas ir tobulinimas (Rebentrost, 2008).



1.1 pav. Betono technologijos vystymasis ir svarbiausi pasiekimai (sudaryta autoriaus)

Maždaug 1980 m. buvo išrastas superplastiklis, o tai leido sumažinti vandens ir cemento santykį iki 0,30. Taikant tuometines technologines priemones, mažesnio vandens ir cemento santykio niekam nepavyko pasiekti, tačiau kartu buvo laikomasi nuomonės, jog toliau mažinti V/C santykį dėl technologinių priežasčių nėra tikslinga. 1980 m. betonuose pradėta utilizuoti silicio mikrodulkes, lakiuosius pelenus, aukštakrosnių šlakus ir kitus aktyviuosius mineralinius priedus (Nematollahi, 2012). 1981 m. Prancūzijos mokslininkas Bache (1981) iškėlė neįprastą idėją – dalį cemento pakeisti silicio mikrodulkėmis ir į sudėtį įtraukti kur kas didesnę superplastiklio kiekį, o betono mišinio sudėtį optimizuoti pritaikant tankiausios dalelės sanglaudos teoriją. Tai leido jam

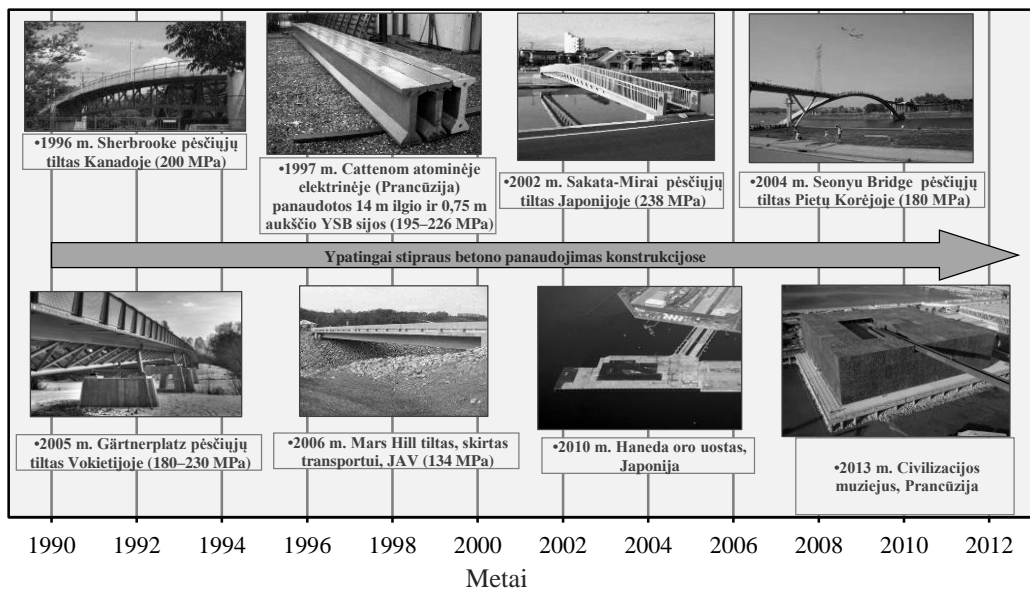
pirmajam sukurti betono mišinį su labai mažu vandens ir rišiklio santykiu ($V/C = 0,16$). Šio betono gniuždymo stipris siekė 280 MPa. Ir tai yra pirmasis oficialus atvejis, kai pasaulinėje praktikoje pavyko sukurti betono mišinio sudėtį, kurioje rišamoji medžiaga buvo cementas. Nuo to laiko Prancūzijoje prasidėjo labai intensyvus šios medžiagos tyrimas.

1.1 lentelė. Svarbiausi pasiekimai betono technologijoje (Naaman, 2012)

Metai	Svarbiausi pasiekimai	
	Betono technologijoje	Pluošto technologijoje
1960–1970	<ul style="list-style-type: none"> • Geriau suprastas cemento hidratacijos mechanizmas ir gelio struktūra. • Geriau suprasta susitraukimo deformacijos, valkšnumo ir poringumo įtaka betono struktūrai ir savybėms. • Pirmą kartą panaudotas 50 MPa gniuždymo stiprio betonas gamybinėmis sąlygomis. • Plastiklio išradimas. • Geriau suprasta betono kietinimo sąlygų įtaka betono struktūrai ir savybėms. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pradėtos naudoti plieninis, stiklo ir sintetinis armuojantis pluoštas.
1970–1980	<ul style="list-style-type: none"> • Spartus cheminių priedų tobulinimas ir superplastiklio sukūrimas. • Silicio mikrodulkių, lakiųjų pelenų, aukštakrosnių šlako ir kitų aktyviųjų mineralinių priedų utilizavimas betonuose. • Pagerintos betono technologinės savybės. • Pradėtas mažinti V/C santykis; 	<ul style="list-style-type: none"> • Deformuotos formos armuojantis pluoštas. • Mažo tamprumo modulio sintetinis armuojantis pluoštas. • Padidėjo stiklo pluošto poreikis. • Pradėtas naudoti mikropluoštas.
1980–1990	<ul style="list-style-type: none"> • Tolesnis intensyvus cheminių priedų tobulinimas. • Pradėtas mažinti cemento kiekis, keičiant dalį cemento aktyviaisiais mineraliniais priedais;. • Sukurtas savaime sutankėjantis ir ypač stiprus betonas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sukurtas plienu armuojantis pluoštas užlenktais galais. • Sukurtas polimerinis pluoštas, chemiškai suaugantis su cemento hidratacijos metu susidariusiais naujadarais;
1990–2000	<ul style="list-style-type: none"> • Patentuota ypač stipraus betono mišinio sudėtis, kurią pradėta plačiai tyrinėti įvairiose statybinėse konstrukcijose. • Patobulinta tankiausios dalelių sanglaudos teorijos koncepcija, kuri pritaikyta skaičiuojant ypač stipraus betono sudėtį. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pradėtas naudoti įvairių formų armuojantis plieninis pluoštas. • Pradėti naudoti anglies nanovamzdeliai.
2000–2010	<ul style="list-style-type: none"> • Geriau suprasta cemento matricos struktūra nano lygmeniu. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pradėtas naudoti anglies nanopluoštas.

Didžiausią dėmesį ypač stipraus betono tyrimui skyrė dvi nepriklausomos Prancūzijos organizacijos „Eiffage Group“ ir „Boygues Construction“, atitinkamai padedant „Sika AG Corporation“ ir „Lafarge Corporation“. Po intensyvių tyrimų buvo sukurtos dvi iš esmės skirtingos ypač stipraus betono mišinio sudėtys. „Eiffage Group“ kartu su „Sika AG Corporation“ sukūrė ypač stiprų betoną, naudodamos stambios frakcijos užpildą, kurio gniuždymo stipris siekė iki 150 MPa, o „Boygues Constructrion“ kartu su „Lafarge Corporation“ sukūrė ypač stiprų betoną, naudodamos smulkios frakcijos užpildą, kurio gniuždymo stipris siekė 150–250 MPa (Jungwirth, 2004). Vėliau, 1990 m., ši medžiaga Prancūzijoje buvo užpatentuota *ypač stipraus betono mišinio* pavadinimu ir

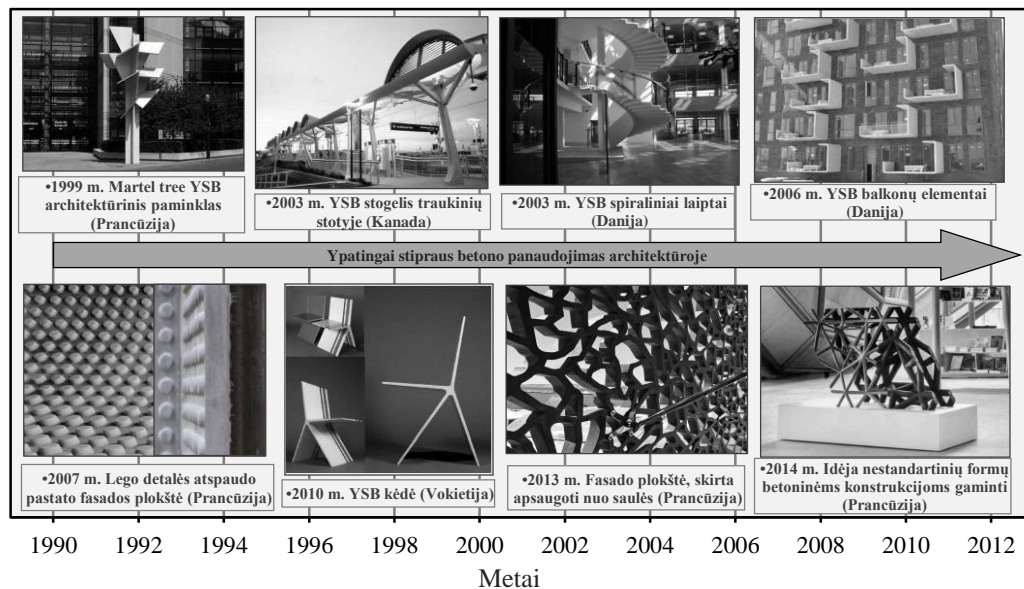
išleistos pirmosios ypač stipraus betono mišinio gaminimo rekomendacijos, kurios buvo pateiktos Australijos, Japonijos, Vokietijos ir Junginių Amerikos Valstijų mokslininkams, kad ši medžiaga būtų toliau tobulinama ir tyrinėjama. 1994 m. Richard (1995), taikydamas vibropresavimo ir autoklavinio kietinimo būdus, pasiekė 800 MPa gniuždymo stiprio betoną. Kol kas tai yra didžiausio gniuždymo stiprio betonas, paskelbtas mokslinėje publikacijoje. Šiuo metu yra geriau suprasta cemento mikro- ir nanostruktūra, todėl betono technologijoje taikomos įvairios nanostruktūrą modifikuojančios medžiagos ir toliau siekiama gerinti betono mechanines, ilgalaikiškumo savybes, naujai sukurtas medžiagas pritaikyti gamybinėmis sąlygomis. Svarbiausi technologiniai pasiekimai betono technologijoje, nulėmę ypač stipraus betono atsiradimą, pateikti **1.1 paveiksle** bei **1.1 lentelėje**.



1.2 pav. Ypač stipraus betono naudojimo galimybės konstrukcijose (sudaryta autoriaus)

Šiuo metu ypač stiprus betonas yra labai plačiai panaudotas daugelyje pasaulio šalių ir statant ar renovuojant betonines ar gelžbetonines konstrukcijas, ir įvairiuose architektūros elementuose (**1.2 ir 1.3 paveikslai**). Pirmasis inžinerinis statinys, kuriame buvo panaudotas ypač stiprus betonas, yra 1996 m. Kanadoje pastatytas *Sherbrooke* pėsčiųjų tiltas (ilgis – 60 m, plotis – 3,5 m, plokščių storis – 30 mm, gniuždymo stipris – 200 MPa (Lopez, 2012)). 1997–1998 m. buvo pirmasis atvejis, kai ypač stiprus betonas buvo panaudotas renovuojant Prancūzijoje esančią *Cattenom* atominę elektrinę (Resplendino, 2012). Atominės elektrinės vėsinimo bokštuose esančias plienines sijas, kurias veikė nepaprastai agresyvi aplinka, pakeitė į gelžbetonines sijas, pagamintas iš ypač stipraus betono. Buvo pastebėta, jog anksčiau naudotos plieninės sijos susidėvėdavo per 6–12 mėnesių, o kai buvo pakeistos į gelžbetonines sijas, pagamintas iš ypač stipraus betono, sijos naudojamos iki šios dienos. 2000 m. gelžbetoninės sijos buvo dar kartą patikrintos. Pastebėta, jog ant jų yra susikaupęs suodžių sluoksnis, tačiau pačios sijos nepažeistos, o projektinės savybės nepakitusios. Ypač stiprus betonas taip pat buvo panaudotas gaminant 2002 m. *Sakata-Mirai* pėsčiųjų tiltą Japonijoje, 2004 m. *Seonyu* pėsčiųjų tiltą Pietų Korėjoje, 2005 m. *Gärtnerplatz* pėsčiųjų tiltą Vokietijoje, 2006 m.

Mars Hill pirmąjį tiltą, skirtą automobilinei transportui, 2010 m. statant *Haneda* oro uostą Japonijoje, 2013 m. statant civilizacijos muziejų Prancūzijoje (Lopez, 2012; Resplendino, 2012). Taip pat ypač stiprus betonas panaudotas gaminant sienų apdailos plokštes, laiptų elementus, šulinio elementus, baldus ir visur kitur, kur norima pagaminti plonasiene, architektūriniu požiūriu patrauklias konstrukcijas.



1.3 pav. Ypač stipraus betono naudojimo atvejai architektūroje (sudaryta autoriaus)

Šiuo metu Lietuvoje dar nėra nė vienos konstrukcijos, pagamintos iš ypač stipraus betono. Masinėje gamyboje aukščiausios klasės betonas (C50/60) naudojamas gaminant gelžbetoninius pabėgius (www.swetrak.lt). Statinys, kuriame panaudotas aukščiausios klasės betonas, yra Vilniaus verslo centre „Europa“. Jame penkių aukštų požeminiame garaže esančiose kolonose panaudotas C70/85 klasės betonas. Pirmą kartą didesnio nei 100 MPa gniuždymo stiprio betonas Lietuvoje paminėtas 1964 m. M. Malakausko disertacijoje „Betono su pakartotinai maltu cementu stiprumas ir deformacijos“, didesnio nei 100 MPa gniuždymo stiprio betoną pavyko užmaišyti naudojant vibracinę maišyklę (Malakauskas, 1964). 2002 m. didesnio nei 100 MPa gniuždymo stiprio betonas buvo paminėtas V. Vaitkevičiaus disertacijoje „Stipriojo betono struktūros ir gamybos technologiniai tyrimai“ (Vaitkevičius, 2002). Visi šie tyrimai buvo atlikti Kauno technologijos universiteto Statybinių medžiagų katedros Mokomojoje laboratorijoje. Tačiau iki šiol Lietuvoje ypač stiprus betonas platesnio mokslininkų dėmesio nesulaukė.

1.1. Ypač stipraus betono mišinio komponentų parinkimas ir jų įtaka betono struktūrai bei savybėms

Į standartinę ypač stipraus betono mišinio sudėtį įeina: portlandcementis, silicio mikrodulkės, maltas ir nemaltas kvarcinis smėlis, superplastiklis ir vanduo. Kiekvienas komponentas atlieka savo funkciją, todėl tinkamas komponentų ir jų proporcijos parinkimas yra labai svarbus etapas. Kadangi ypač stipraus betono mišinio sudėtis labai skiriasi nuo įprastinės ar stipriojo betono sudėties (**1.2 lentelė**), tikslinga panagrinėti, kokie komponentai tinkami ypač stipraus betono mišinio gamybai ir kokią funkciją jie atlieka.

1.2 lentelė. Įprastinio, stipriojo ir ypač stipraus betono mišinio sudėtys ir pagrindinės fizikinės ir mechaninės savybės (Dugat, 1996; Castellote, 2003; Droll, 2004)

Komponentas	Įprastinės sudėties betonas	Stiprusis betonas	Ypač stiprus betonas
Kiekis, kg/m ³			
Cementas	<400	400	600–1200
Stambus užpildas	~1000	900	-
Smėlis	~700	600	500–1400
Silicio mikrodulkės	–	40	50–300
Pluoštas	Pagal projektą		40–250
Superplastiklis	<0,5	<5	10–70
Vanduo	>200	100–150	110–260
Pagrindinės savybės (po 28 parų)			
V/C santykis	0,40–0,70	0,24–0,38	0,15–0,27
Stambiausio užpildo dalelės dydis, mm	19–30	9,5–12,5	0,15–0,60
Tankis, kg/m ³	2000–2800	2000–2800	2300–2800
Poringumas, %	20–25	10–15	2–6
Gniuždymo stipris, MPa	<60	60–100	>150
Tempimo stipris, MPa	<3	<5	>8
Tamprumo modulis, GPa	~30	<45	50–70

1.1.1. Kvarcinis smėlis

Ypač stipraus betono mišinio gamybos technologijoje iškelta gana neįprasta idėja – nėra stambaus užpildo. Todėl pagal savo struktūrą šis betonas yra kur kas artimesnis skiedinio nei įprastinio ar stipriojo betono struktūrai. Dažniausiai naudojamas užpildas yra kvarcinis smėlis, nes jis nėra chemiškai aktyvus. Būtų tinkamiausia, kad šio užpildo dalelių dydis kistų nuo 150 μm iki 600 μm. Vengiama naudoti užpildo dalelių, smulkesnių nei 150 μm dydžio, nes tokiame mišiniui reikės didesnio vandens kiekio (Richard, 1995). Siekiant pagerinti mišinio technologines savybes, kartais naudojami stambesnės frakcijos užpildai (dalelės dydis iki 8 mm). Pagrindiniai ypač stiprių betonų gamyboje naudojami stambesnės frakcijos užpildai pateikti **1.3 lentelėje**. Tačiau pastebėta, jog, naudojant stambesnės frakcijos užpildus, gaunamas mažesnis gniuždymo stipris (<160 MPa).

Pagrindinės gniuždymo stiprio sumažėjimo priežastys:

1. Tarp užpildo ir cementinės matricos yra linkęs formuotis didesnis kiekis portlandito, taip pat šioje zonoje susidaro didžiausias kiekis kapiliarinių porų (Heinz, 2012). Kapiliarinių porų ir portlandito kiekis tuo didesnis, kuo didesnis mišinio vandens

ir cemento santykis (Tuan, 2012). Ypač stipriuose betonuose ši problema sprendžiama parenkant optimalią mišinio granulimetrinę sudėtį, mažinant V/C santykį ir naudojant aktyviuosius mineralinius priedus.

2. Naudojant stambesnės frakcijos trupintus užpildus pastebėta, jog trupinamose dalelėse susidaro įvairaus dydžio mikroįtrūkių, dėl to užpildo tikrasis stipris gali labai sumažėti. Taip pat mikroįtrūkiai turi neigiamą įtaką užpildo ilgalaikiškumui. Ši problema sprendžiama naudojant smulkesnės frakcijos užpildus. Manoma, kad smulkesnės frakcijos užpilde yra palyginti mažesnė defektų koncentracija (Tuan, 2012).

1.3 lentelė. Pagrindiniai YSB mišinyje naudojami inertiniai užpildai ir jų savybės (Naaman, 2012)

Komponentas	Tankis, kg/m ³	Santykinis vandens įgėris, %	Gniuždymo stipris, MPa	Statinis tamprumo modulis, GPa
Granitas	2400–2700	0,2–0,5	160–330	38–76
Bazaltas	2900–3000	0,1–0,3	200–400	80–160
Kvarcas	2500–2600	0,2–0,5	150–300	50–60
Dioritas/Gabras	2800–3000	0,2–0,4	170–300	50–60
Smiltainis	2400–2700	0,2–9,0	50–250	60–80

1.1.2. Maltas kvarcinis smėlis

Malto kvarcinio smėlio pagrindinės funkcijos: pagerinti mišinio granulimetrinę sudėtį ir padidinti santykinį mišinio tankį. Tai leidžia labai sumažinti vandens poreikį normalaus tirštumo tešlai pasiekti. Nustatyta, jog maltas kvarcinis smėlis, net ir praėjus labai ilgam laikui 20 °C temperatūroje, yra inertinė medžiaga, tačiau kietinant autoklavinėmis sąlygomis pasižymi pucolaninėmis savybėmis (Schachinger, 2008). Kadangi ypač stipraus betono mišinyje sunaudojama labai daug cemento, naudojant maltą kvarcinį smėlį galima iki 30 % sumažinti cemento (Ma, 2002). Paprastai YSB gamyboje naudojamo malto kvarcinio smėlio smulkumas kinta nuo 0,1 m²/g iki 10,0 m²/g.

1.1.3. Cementas

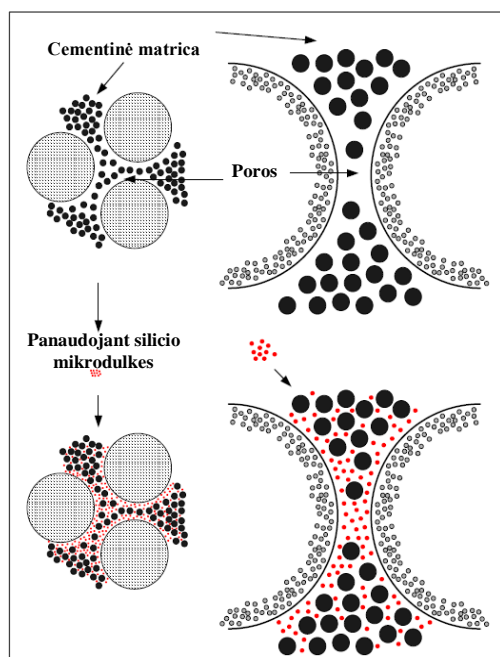
Gaminti YSB tinka bet koks įprastinis portlandcementis. Paprastai jis susideda iš klinkerio ir iki 5% gipso. Klinkeryje dominuoja keturi pagrindiniai mineralai: C₃S; C₂S; C₃A ir C₄AF (**1.4 lentelė**). Dažniausiai naudojami 42,5 R arba 52,5 R stiprio klasės cementai, kuriuose būtų kuo didesnis kiekis C₂S ir C₃S ir kuo mažesnis C₃A (Aitcin, 2000). Didelis C₃A kiekis nepageidaujamas dėl šių priežasčių: 1) mažina superplastikio efektyvumą; 2) didina susitraukimo deformacijas; 3) didina hidratacijos metu išsiskiriantį šilumos kiekį. 42,5 R klasės cementas paprastai naudojamas dėl to, jog jis yra rudesnis, todėl mišiniui užmaišyti reikia mažiau vandens (Mindess, 2003). Į cemento sudėtį turėtų įeiti kuo mažiau CaO ir MgO, nes šie junginiai didina cemento tešlos tūrinį plėtimąsi. Didelis šarmų kiekis (Na₂O ir K₂O) taip pat yra ribojamas (Na₂O_{ek} ≤ 0,80 %) ir nėra pageidaujamas, nes dėl didesnio šarmų kiekio taip pat mažėja superplastikio efektyvumas, didėja oro kiekis mišinyje, mažėja vėlyvasis stipris. Tačiau daugiausia įtakos betono struktūrai turi hidratacijos metu susidarę naujadarai ir jų modifikacijos, kurie bus plačiau panagrinėti vėlesniuose skyriuose.

1.4 lentelė. Pagrindinių klinkerio mineralų savybės (Tailor, 1997; Jenings, 2011)

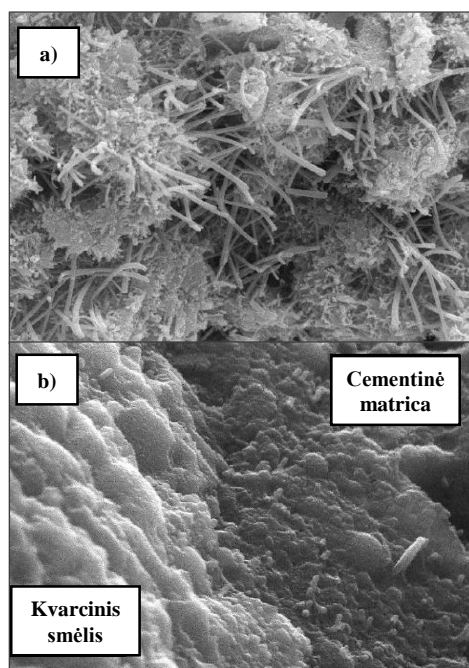
Sutrumpintas žymuo	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Techninis pavadinimas	Alitas	Belitas	Aluminatinė fazė	Feritinė fazė
Kiekis, įeinantis į cemento sudėtį, %	40–80	15–30	3–15	4–15
Tankis, g/cm ³	3,15–3,21	3,28	3,03	3,73
Galimos priemaišos	Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃ ; MgO	Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃ ; Na ₂ O; K ₂ O; SO ₃	Fe ₂ O ₃ ; Na ₂ O; K ₂ O; MgO	MgO; SiO ₂ ; TiO ₂
Hidratacijos metu išsiskiriantis šilumos kiekis, J/g	500	250	1340	420
Hidratacijos metu maksimalus chemiškai surišto vandens kiekis, %	24	21	40	37

1.1.4. Silicio mikrodulkės

Populiariausias aktyvusis mineralinis priedas, naudojamas gaminant YSB, yra silicio mikrodulkės. Tai ferosilicio lydinių atlieka su labai dideliu kiekiu amorfinio SiO₂ (**1.5 lentelė**). Silicio mikrodulkės gali būti patiekiamos trimis skirtingais būdais: kaip suspensija, granuliuotos ir negranuliuotos. Silicio mikrodulkes reikėtų rinktis kuo grynesnes, su kuo mažesniu anglies kiekiu, nes anglis padidina vandens poreikį norint gauti normalaus tirštumo teslą (Kowald, 2004).



1.4 pav. Silicio mikrodulkių įtaka betono mikrostruktūrai (Vogt, 2010)



1.5 pav. Betono mikrostruktūra: a – įprastinio; b – ypač stipraus (Schmidt, 2007)

Silicio mikrodulkės pasižymi dideliu pucolaniniu aktyvumu, todėl jos yra plačiai naudojamos gaminant YSB. Tačiau silicio mikrodulkės turi didelį trūkumą – tai brangi

gamybos atlieka, kurios kiekis yra ribotas. Todėl gaminant YSB naudojami ir kiti ne tokie brangūs aktyvieji mineraliniai priedai: lakieji pelenai, aukštakrosnių šlakas, metakaolinas (**1.5 lentelė**).

Aktyvieji mineraliniai priedai YSB gamyboje naudojami dėl dviejų pagrindinių priežasčių: 1) pagerina mišinio granulimetrinę sudėtį, dėl to santykinis mišinio tankis padidėja, o vandens poreikis normalaus tirštumo tešlai sumažėja (**1.4 paveikslas**); 2) pucolaninės reakcijos metu aktyvusis mineralinis priedas, reaguodamas su cemento hidratacijos metu susidariusiu portlanditu, sudaro antrinės hidratacijos mažo bazingumo kalcio hidrosilikatus, kurie turi teigiamą įtaką betono mikrostruktūrai ir mechaninėms savybėms (**1.5 paveikslas**).

1.5 lentelė. Pagrindinės cemento ir aktyviųjų mineralinių mikroužpildų fizikinės ir cheminės savybės (König, 2001; Droll, 2003)

Komponentas	Cementas	Lakieji pelenai	Silicio mikrodulkės	Silicio nanodulkės	Metakaolinas	Aukštakrosnių šlakas
SiO ₂ , %	18–24	40–60	80–99	100	51–55	30–39
Al ₂ O ₃ , %	4–8	23–24	0,5–20	–	40–42	9–18
Fe ₂ O ₃ , %	1–5	2–16	0,1–5	–	0,5–4,6	0,1–1
CaO, %	61–69	0,6–8,5	0,7–2,5	–	0,1–0,4	33–48
Tankis, g/cm ³	3,0–3,2	2,2–2,4	2,2–2,3	2,2–2,6	2,4	2,0–2,8
Vidutinis dalelės dydis, μm	10–25	10–30	0,1–0,5	~0,015	~1,3	0,1–10
Savitasis paviršius (m ² /g)	0,3–0,6	0,3–0,8	16–22	180–690	10–16,8	0,8–1,5

Nors silicio mikrodulkės kaip gamybos atlieka betonuose naudojamos seniai, iki galo jų poveikis betono struktūrai ir optimalus kiekis dar nėra ištirtas. Nustatyta, kad norint, jog iki galo įvyktų pucolaninė reakcija, reikia 18 % (cemento masės) silicio mikrodulkių (Yu, 2014). Ma (2002), dirbdamas su ypač stipriu betonu, nustatė, jog silicio mikrodulkėse turėtų būti daugiau kaip 25 % (cemento masės), vien tam, kad būtų išgautas tankesnės struktūros betonas. Kennouche (2013) nustatė, jog, naudojant didelius silicio mikrodulkių kiekius, suprastėja betono technologinės savybės, todėl daugiau kaip 15 % (cemento masės) nevertėtų naudoti. Hegazy (2012) silicio mikrodulkes pritaikė plytų gamybai, kurios buvo naudojamos ypač agresyviomis aplinkos sąlygomis, ir nustatė, jog geriausiomis mechaninėmis ir ilgalaikiškumo savybėmis pasižymėjo tos skiedinio sudėtys, kuriuose buvo panaudota 25 % (cemento masės) silicio mikrodulkių. Geisenhaunsluke (2004) pasiūlė idėją, jog optimalus silicio mikrodulkių mišinyje kiekis yra tas, kuriam esant gaunamas mažiausios dinaminės klampos mišinys. Vėlesniuose tyrimuose Schmidt (2005) papildė šia prielaidą ir nustatė, jog didžiausio santykinio tankio mišinys pasižymės tankiausia dalelių sanglauda, todėl tokiam mišiniui reikės mažesnio kiekio vandens ir jis bus mažesnės dinaminės klampos. Maroliya (2012) savo tyrimuose pastebėjo, jog optimalus silicio mikrodulkių kiekis priklauso nuo kietinimo sąlygų ir V/C santykio. Pagal literatūros analizę nėra aišku, koks yra optimalus silicio mikrodulkių kiekis mišinyje, tačiau priklauso nuo mišinio granulimetrinės sudėties, betono rūšies, norimo technologiškumo bei pageidaujamų mechaninių ir ilgalaikiškumo savybių.

1.1.5. Maltas stiklas

I malto stiklo sudėtį įeina didelis kiekis amorfinio SiO_2 , todėl galbūt galėtų būti naudojamas YSB gamyboje ir netgi pakeisti silicio mikrodulkes. Stiklo sudėtis labiausiai priklauso nuo stiklo rūšies (**1.6 lentelė**), tačiau plačiausiai naudojamo natrio silikatinio stiklo struktūroje aptinkami dideli kiekiai amorfinio SiO_2 ($\geq 65\%$), Na_2O ($\geq 12\%$) ir CaO ($\geq 5\%$). Todėl teoriškai dėl cheminės sudėties maltas stiklas galėtų būti puiki pucolinė medžiaga. Tačiau maltas stiklas turi didelį kiekį Na_2O , kuris, esant reaktyviajam amorfinės struktūros užpildui, gali paskatinti šarminę koroziją. Šios korozijos metu reaktyvieji užpildai linkę didinti savo tūrį, dėl kurių atsiranda dideli vidiniai įtempimai, o medžiagos struktūra sutrūkinėja. Pagal LST EN 206:2013, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ek}}$ neturėtų būti didesnis kaip 0,80 %, tačiau praktikoje yra daugybė atvejų, kur ši vertė buvo peržengta ir neigiamo šarminės korozijos poveikio nėra įvykę. Todėl tikslinga malto stiklo poveikio įtaka betonui panagrinėti išsamiau.

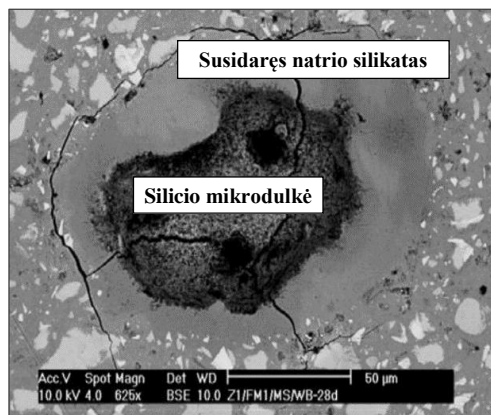
1.6 lentelė. Pagrindinių pramonėje gaminamų stiklų rūšys ir jų cheminės sudėtys (Shi, 2007)

Stiklo rūšis	Cheminio junginio kiekis, %								
	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	Na_2O	K_2O	MgO	CaO	BaO	PbO
Natrio silikatinis (angl. <i>Soda-lime glass</i>)	66–75	0,7–7	–	12–17	0,1–3,0	0,1–5,0	5–12	–	–
Boro silikatinis (angl. <i>Borosilicate glass</i>)	72–81	1–6	11–15	4–7	0–1	–	–	–	–
Švininis (angl. <i>Lead glass</i>)	32–63	1–2	–	1–8	2–9	–	–	–	22–65
Bario (angl. <i>Barium glass</i>)	36–65	2–4	0–10	0–7	0–9	0–2	0–2	0–2	2–41
Aliuminio (angl. <i>Aluminosilicate glass</i>)	57–65	16–25	4–5	0,5–1	–	7–11	8–10	0–6	–

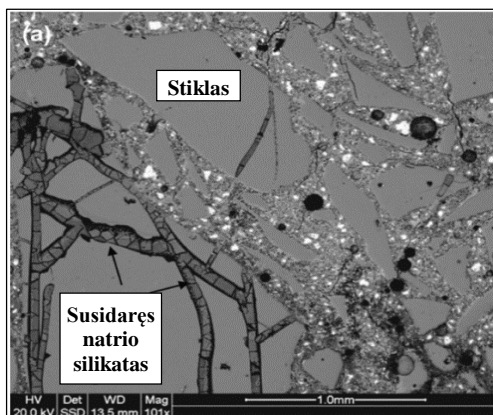
Pastaba: ¹ – Sudėtyje taip pat gali būti iki 10% SrO arba iki 9 % ZnO .

Corinaldesi (2005) tyrinėjo įvairių skiedinių struktūrą, kuriuose smėlis buvo pakeistas maltu stiklu (V/C kito nuo 0,56 iki 1,00) ir pastebėjo ženklų (nuo 32 MPa iki 60 MPa) gniuždymo stiprio padidėjimą. Gniuždymo stiprio padidėjimo nepaaiškino, tačiau šis fenomenas buvo priskirtas maltam stiklui. Zerbino (2012) dirbo su skiediniais, kuriuose buvo panaudoti ryžių lukštai (V/C svyravo nuo 0,44 iki 0,56) ir pastebėjo, kad naudojant ryžių lukštus šarminė korozija prasideda tik tuo atveju, kai $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ek}} \geq 5,25 \text{ kg/m}^3$. Juengera (2004), dirbdama su silicio mikrodulkėmis, dalyje bandinių pastebėjo neįprastas išsiplėtimo deformacijas, bandiniai brinko dėl panaudotų silicio mikrodulkių. Šis brinkimas buvo susietas su nehomogenišku silicio mikrodulkių pasiskirstymu, kuris galėjo įvykti dėl netinkamo mišinio sumaišymo (**1.6 paveikslas**). Hongjian (2013) atliko eksperimentinius tyrimus, kuriuose panaudojo žalios, rudos ir baltos spalvos stiklą (stiklo dalelių dydis $\sim 75 \mu\text{m}$). Nors destruktivaus išsiplėtimo bandiniuose nepavyko aptikti, tačiau buvo pastebėta, kad mišiniai, kuriuose buvo panaudotas baltos spalvos stiklas, pasižymėjo didžiausiomis išsiplėtimo deformacijomis; betono mišinio sudėtys, kuriose buvo panaudotas žalios spalvos stiklas, pasižymėjo tris kartus mažesnėmis išsiplėtimo deformacijomis, o betono mišinio sudėtys, kuriose buvo panaudotas rudos spalvos stiklas, – devynis kartus mažesnėmis išsiplėtimo deformacijomis, lyginant su baltos spalvos stiklu. Sumažėjusios išsiplėtimo deformacijos buvo paaiškintos dėl skirtingos

spalvos į stiklo sudėtį įeinančio didėjančio Cr_2O_3 kiekio. Long (2008) savo eksperimentiniuose tyrimuose, naudodamas LCD stiklą (smulkumas pagal Bleiną – $370 \text{ m}^2/\text{kg}$) ir pritaikydamas magnetinio branduolių rezonanso metodą bei termografinės analizės metodą, pastebėjo cementinėje matricoje labai padidėjusį kalcio hidrosilikatų kiekį ir sumažėjusį portlandito kiekį. Cong (2012) panaudojo maltą stiklą ypač stiprių betonų gamyboje (V/R santykis 0,15) ir pastebėjo, jog maltas stiklas gali gerokai padidinti betono gniuždymo stiprį vėlyvuju kietėjimo periodu, tačiau kaip pucolaninis priedas yra labai neefektyvus. Shafaatian (2013), naudodamas mišiniuose (V/C = 0,47) lakiuosius pelenus ir maltą stiklą (malto stiklo dalelės dydis svyravo nuo $150 \text{ }\mu\text{m}$ iki $4,75 \text{ mm}$), pastebėjo, jog dalyje bandinių susiformavo skystas natrio silikatas. Skystas natrio silikatas susiformavo tik tose stiklo vietose, kuriose buvo mikroįtrūkių (**1.7 paveikslas**). Idir (2009) savo eksperimentiniuose tyrimuose naudojo įvairaus smulkumo stiklą ir pastebėjo, jog mišiniuose, kuriuose malto stiklo dalelių dydis yra $\geq 1000 \text{ }\mu\text{m}$, gali pasireikšti destruktuvios išsiplėtimo deformacijos, tačiau taip pat pastebėjo, jog jei stiklas yra sumaltas iki cemento smulkumo (dalelių dydis nuo $10 \text{ }\mu\text{m}$ iki $20 \text{ }\mu\text{m}$), tai veikia kaip pucolaninis priedas. Nassar (2012) dirbo su mišiniais (V/C kito nuo 0,38 iki 0,50), kuriuose panaudojo maltą stiklą (vidutinis dalelių dydis $\sim 13 \text{ }\mu\text{m}$), ir pastebėjo, jog maltas stiklas veikia kaip pucolaninis priedas, padidinantis skiedinių gniuždymo stiprį ir pagerinantis medžiagos mikrostruktūrą, todėl vandens įgėris sumažėja. Ichikawa (2007) sukūrė modelį ir paaiškino, kada stiklas mišinyje gali sukelti šarminės korozijos išsiplėtimo deformacijų, o kada veikia kaip pucolaninis priedas. Pagal pasiūlytą matematinį modelį maltas stiklas, nepriklausomai nuo panaudoto kiekio, veiks kaip pucolaninis užpildas, kai malto stiklo dalelių dydis bus mažesnis nei $50 \text{ }\mu\text{m}$. Taigi pagal atliktą literatūros analizę pažymėtina, jog maltas stiklas gali ne tik pagerinti betono mikrostruktūrą, padidinti gniuždymo stiprį, bet ir veikti kaip pucolaninis priedas, tačiau išsamesni eksperimentiniai tyrimai yra būtini.



1.6 pav. Aglomeravusi silicio mikrodulkė, sukėlusį šarminę betono koroziją (Juengera, 2004)



1.7 pav. Skiedinio struktūra, kuriame panaudotas maltas stiklas. Natrio silikato gelis susiformavo tik stiklo įtrūkimo vietose (Shafaatian, 2013)

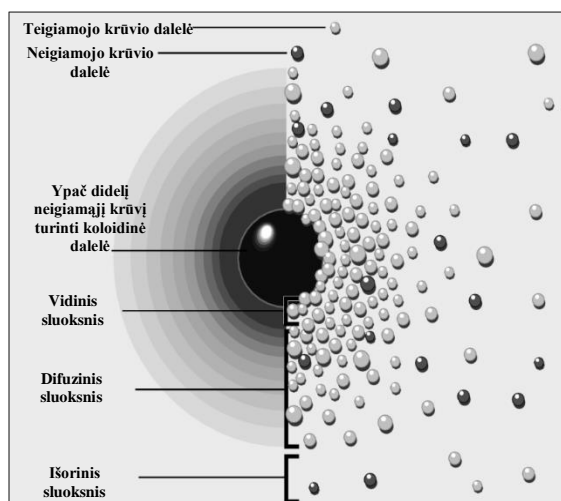
1.1.6. Superplastiklis

Gaminant YSB panaudojamas labai mažas vandens kiekis ($V/C \leq 0,27$), tai įmanoma pasiekti tik naudojant labai efektyvius superplastiklius. Tinkamiausi yra polikarboksilato eterio pagrindu sukurti superplastikliai. Tačiau ne visų polikarboksilato eterių pagrindu sukurtų superplastiklių efektyvumas yra vienodas. Taip yra dėl to, jog mišinyje panaudotos skirtingo dydžio dalelės pasižymi nevienodomis absorbcinėmis savybėmis. Ypač stipraus betono mišinys susideda iš įvairaus dydžio dalelių, kurios, sąveikaudamos su vandeniu, sudaro suspensinę sistemą. Priklausomai nuo komponentų dalelių tarpusavio sąveikos, priklausys betono mišinio technologinės savybės (slankumas, sklidumas, dinaminė klampa ir t. t.). Nustatyta, jog panaudotų užpildų tarpusavio sąveika labai priklauso nuo užpildo dalelės dydžio (**1.7 lentelė**).

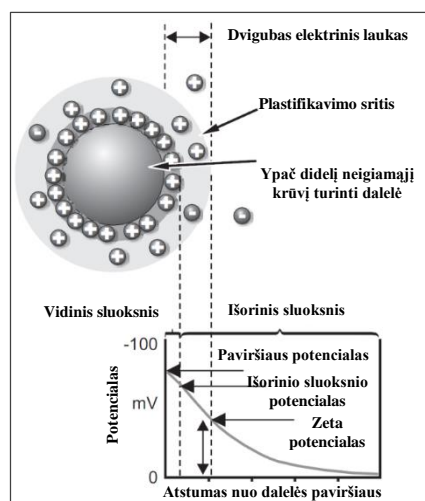
1.7 lentelė. Jėgos, pasireiškiančios suspensinėje sistemoje (Cartuxo, 2015)

Dalelės dydis	Dalelės tipas	Dominuojančios sąveikos jėgos
> 1 mm	Smėlis, žvyras	Gravitacinė jėga, šlyties įtempiai
1 – 0,1 mm	Smėlis	Kapiliarinės jėgos
0,1 – 10^{-6} mm	Cemento dalelės, mikroužpildas, hidratacijos produktai	Koloidinės jėgos (elektrostatinės, Van der Valso jėgos)

Suspensinėje sistemoje esančios įvairaus dydžio dalelės gali turėti teigiamą ir neigiamą krūvį, dėl to pasireiškia tarpusavio sąveikos jėgos, nuo šių sąveikos jėgų priklausys, kaip bus sumaišytas betono mišinys, kaip pasiskirstys užpildo dalelės, ar pasireikš flokuliacija (Ferrari, 2010). Norint turėti technologišką betono mišinį, tam tikrai komponento dalelei būtina suteikti atitinkamą krūvį, dėl kurio pasireikštų atostūmio jėgos. Priklausomai nuo suteikto krūvio dydžio, priklausys, kaip suspensinėje sistemoje elgsis dalelė: jei bus suteiktas pakankamo dydžio krūvis, dalelė išliks dispersiška, jei krūvio dydis nebus pakankamas – dalelė pradės aglomeruotis į stambesnius junginius.



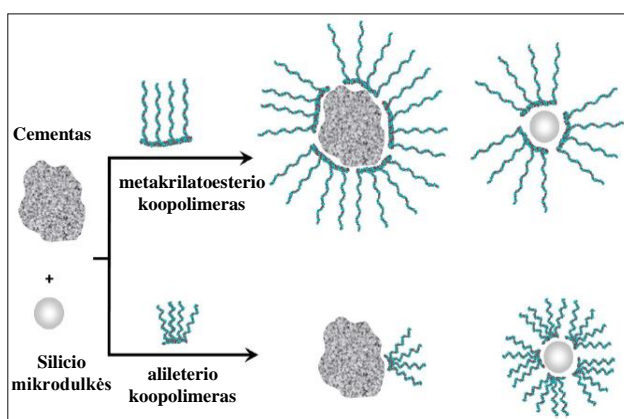
1.8 pav. Dvigubo elektrinio sluoksnio lauko modelis (Talero, 2013)



1.9 pav. Zeta potencialo schema (Safi, 2011)

Kaip suspensinėje sistemoje elgiasi koloidinė dalelė, gali paaiškinti dvigubo elektrinio lauko modelis (angl. *double layer model*). Pagal šį modelį (**1.8 paveikslas**)

koloidinė dalelė turi neigiamąjį krūvį (neigiamasis jonas) ir aplink save traukia teigiamąjį krūvį turinčias daleles (jonus). Dėl elektrinės sąveikos apie koloidinę dalelę susidaro tam tikras standžiai sukibusių teigiamųjų dalelių tankus sluoksniu (vidinis sluoksniu). Nors aplink koloidinę dalelę ir yra susidaręs tankus jonų sluoksniu, tačiau koloidinė dalelė yra pajėgi prie savęs pritraukti tam tikrą papildomą teigiamųjų dalelių kiekį, kuris vadinamas antruoju išoriniu sluoksniu (difuziniu sluoksniu). Difuziniame sluoksnyje gali būti mažą neigiamąjį krūvį turinčių dalelių koncentracija, o koncentracijos kiekis priklausys nuo atstumo iki koloidinės dalelės (**1.9 paveikslas**). Apie kiekvieną tarp neigiamąjį krūvį turinčios ir teigiamąjį krūvį turinčios koloidinės dalelės susidariusį sluoksniu susidaro elektrokinetinis potencialas. Potencialų skirtumas tarp vidinio ir išorinio (difuzinio) sluoksniu vadinamas zeta potencialu (**1.9 paveikslas**). Didėjant zeta potencialui, didėja atostūmio jėgos tarp kitų dalelių ir mažėja trintis tarp koloidinių dalelių. Atostūmio jėgos gali būti modifikuojamos naudojant superplastiklius.



1.10 pav. Polikarboksilato eterio su skirtingais koopolimerais įtaka cemento ir silicio mikrodulkių dispergavimui (Schröfl, 2012)

Mišinio technologinės savybės daugiausia priklausys nuo to, kaip superplastiklio molekulės absorbuosis ant klinkerio mineralų ir silicio mikrodulkių. Silicio mikrodulkės ir atskiros klinkerio mineralo fazės pasižymi skirtingais krūviais: C_2S ir C_3S turės neigiamąjį krūvį, C_3A ir C_4AF turės teigiamąjį krūvį, silicio mikrodulkės – neigiamąjį krūvį. Cemento hidratacijos metu į tirpalą taip pat pateks didelis kiekis Ca^{2+} jonų, kurie bus linkę nusėsti ant neigiamąjį krūvį turinčių dalelių (Puertas, 2005). Todėl superplastiklio dozavimo laikas yra labai svarbus. Plank (2009), tirdamas įvairių superplastiklio rūšių įtaką ypač stipraus betono technologinėms savybėms, pastebėjo, jog ne visų polikarboksilato eterių plastifikavimo efektas yra vienodas. Tai labiausiai priklauso nuo polimero molekulinės masės, grandinės ilgio ir struktūros. Schröfl (2012) išskyrė du pagrindinius dažniausiai naudojamus polikarboksilato eterio superplastiklius, kuriuose dominuoja metakrilato esterio (angl. *methacrylate ester*) ir alileterio (angl. *allylether*) koopolimerai. Tyrimuose pastebėta, kad metakrilato esterio koopolimerai efektyviau disperguoja cemento daleles, o alileterio koopolimerai efektyviau disperguoja silicio mikrodulkes (**1.10 paveikslas**). Tačiau, naudojant skirtingus aktyviuosius mineralinius priedus, superplastiklių efektyvumas taip pat gali skirtis.

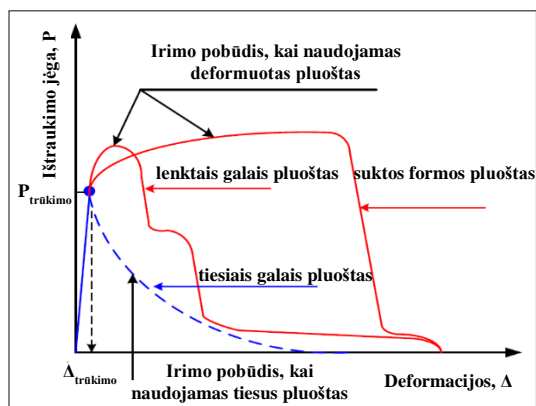
1.1.7. Armuojantis pluoštas

Dažniausiai YSB gamyboje naudojamų armuojančių pluoštų tipai ir charakteristikos pateiktos **1.8 lentelėje**. Pluoštas YSB gamyboje naudojamas tam, kad sumažintų susitraukimo deformacijas ir sumažintų trapų betono suirimą. Park (2012), atlikdamas tyrimus, pastebėjo, kad betono irimo pobūdis labai priklauso nuo pluošto geometrinės formos (**1.11 paveikslas**). Fehling (2012), atlikdamas eksperimentus, atkreipė dėmesį, jog gaminant ilgesnes konstrukcijas ir naudojant plieninę armatūrą dėl didelių ypač stipraus betono susitraukimo deformacijų betono struktūroje gali susiformuoti plyšių (**1.12 paveikslas**).

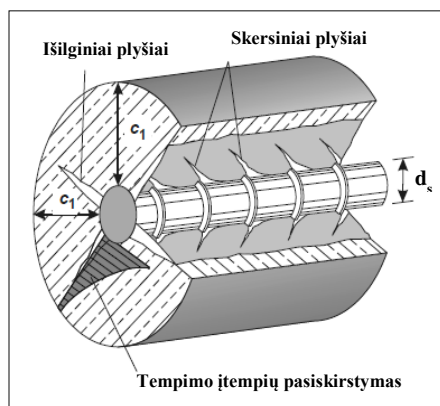
1.8 lentelė. Pagrindiniai YSB gamyboje naudojami armuojančio pluošto tipai (Reinhardt, 2005)

Pluošto tipas	Skersmuo, μm	Tankis, kg/m^3	Tamprumo modulis, GPa	Tempimo stipris, GPa	Pailgėjimas trūkio metu, %
Plieninės	5–500	7840	200	0,5–2	0,5–3,5
Stiklo pluošto	9–15	2600	70–80	2–4	2–3,5
Polipropileninės	20–200	900	5–7	0,5–0,75	8,0
Anglies	5–10	1900	230	2,6	1,0

Paprastai YSB gamyboje naudojamas plieninis pluoštas ir plieninė armatūra, tačiau Schmidt (2003) pabrėžė: jei konstrukcija bus gaminama statinyje, kuriame yra gaisro galimybė, tokioje konstrukcijoje reikėtų naudoti ir polipropileninį armuojantį pluoštą. Kilus gaisrui polipropileninis armuojantis pluoštas, esant $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, pradeda tirpti, o tirpdamas suformuoja kapiliarines poras, per šias poras gali lengviau pasišalinti betono struktūroje esantis laisvasis vanduo, todėl konstrukcija gaisro atveju neturėtų taip greitai suirti.



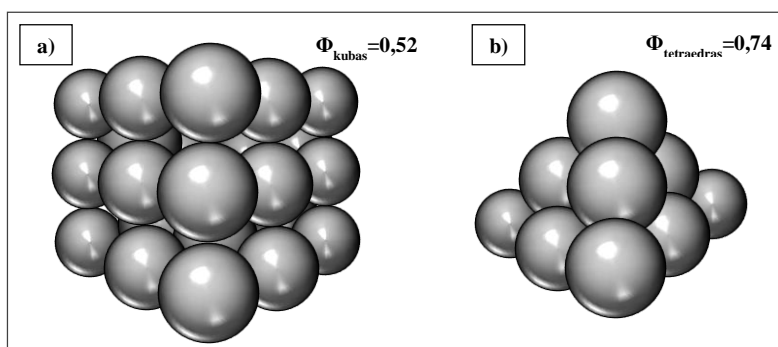
1.11 pav. Pluošto formos įtaka irimo pobūdžiui (Park, 2012)



1.12 pav. Išilginių ir skersinių plyšių susiformavimas naudojant plieninę armatūrą (Fehling, 2012)

1.2. YSB mišinio sudėties projektavimas

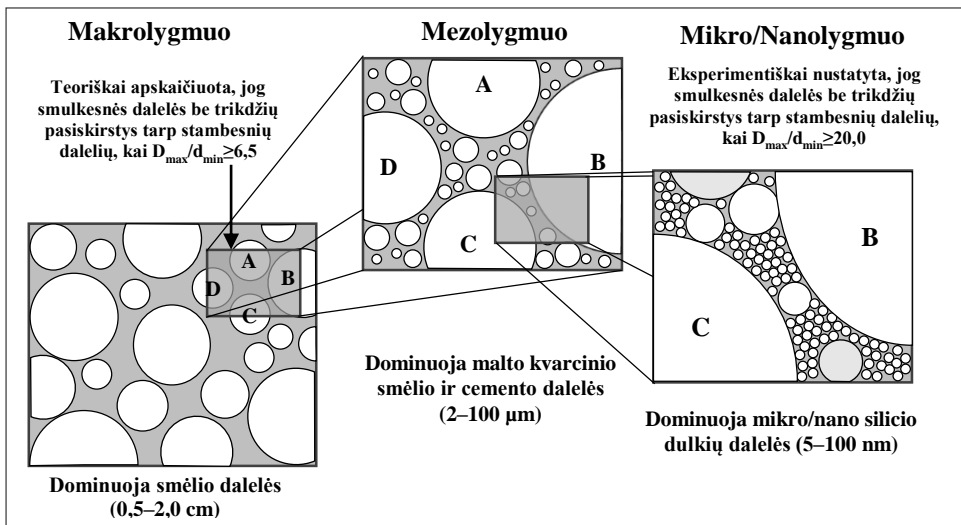
Yra žinoma, kad optimalios mišinio granulimetrinės sudėties parinkimas yra svarbiausias etapas norint pagaminti puikių mechaninių ir ilgalaikiškumo savybių betoną. Dažniausiai projektuojant siekiama sudaryti tankiausios dalelių sanglaudos sistemą. Tai leidžia sumažinti rišiklio sąnaudas, vandens poreikį ir išgauti tankesnės struktūros mažesnio poringumo mišinį. Pastebėta, kad, sumažėjus betono mišinio sudėties poringumui, sukietėjusio betono poringumas taip pat sumažėja. Dėl pagerėjusios mišinio granulimetrinės sudėties santykinis mišinio tankis padidėja ir yra išgaunamas „tobulesnis“ mišinio dalelių tarpusavio pasiskirstymas, kuris turi funkcinę priklausomybę tarp dalelių dydžio, formos, paviršiaus tekstūros ir kitų dalelių tarpusavio sąveikos. Pagrindinė betono mišinio problema ta, jog formuojant jis turi išlikti technologiškas, o tai prieštarauja tankiausios dalelių sanglaudos principui. Todėl, norint išgauti optimalų sistemos tankį, tikslinga panagrinėti tankiausios dalelių sanglaudos teoriją.



1.13 pav. Monodispersinių sferinių dalelių išsidėstymas kubo (a) ir tetraedro (b) formoje (sudaryta autoriaus)

Siekiant tiksliau suprasti tankiausios dalelių sanglaudos principus daugiadispersėje sistemoje, tikslinga iš pradžių panagrinėti monodispersinę sistemą, kuri susideda iš vienodo dydžio dalelių. Monodispersinė sistema yra patogi sudarinėjant įvairius dalelių modelius, tačiau praktiškai retai sutinkama. Sudarinėjant dalelių modelius dažniausiai laikomasi prielaidos, jog visos dalelės yra idealiai sferinės formos. Priklausomai nuo to, kaip sferinės dalelės bus išsidėsčiusios, priklausys santykinis mišinio tankis. Teoriškai apskaičiuota, jei monodispersinėje sistemoje sferinės dalelės bus taisyklingai sudėliotos kubo formoje, tai tokios sistemos santykinis tankis bus 0,52, jei tetraedro formoje – 0,74, jei atsitiktinai išsidėsčiusios – $\leq 0,64$ (**1.13 paveikslas**). Jei į monodispersinę sistemą bus pridėdama skirtingo dydžio dalelių, bus gaunama daugiadispersė sistema. Tokios sistemos santykinis tankis labai priklausys nuo to, kaip smulkesnės dalelės sugebės užpildyti tarpus tarp stambesnių dalelių. Teoriškai apskaičiuota, kad smulkesnė dalelė galėtų užpildyti tarpus tarp stambesnių dalelių, jos skersmuo turi būti bent 6,5 karto mažesnis už stambesnės dalelės skersmenį, tačiau praktiškai nustatyta, jog smulkesnė dalelė turėtų būti bent jau 20 kartų mažesnio skersmens (Oertel, 2013). Teoriškai apskaičiuota, jei daugiadispersėje sistemoje bus panaudotos keturių skirtingų frakcijų sferinės dalelės (skersmenų santykis 1:7:38:316), tai tokios sistemos santykinis tankis gali siekti 0,975, tačiau praktiškai gana sudėtinga rasti idealiai monodispersinę sistemą (Florea, 2013). Todėl projektuojant betono mišinio sudėtį reikėtų taikyti kitokius

skaičiavimo metodus. Pagal atliktą literatūros analizę betono mišinio sudėties optimizavimas dažniau parenkamas taikant optimalią granulimetrinę kreivę arba suskaičiuojant tankiausių dalelių sanglaudą.



1.14 pav. Dalelių pagal dydį išsidėstymas skirtingais struktūros lygiais (sudaryta autoriaus)

1.2.1. Optimalios granulimetrinės kreivės parinkimas

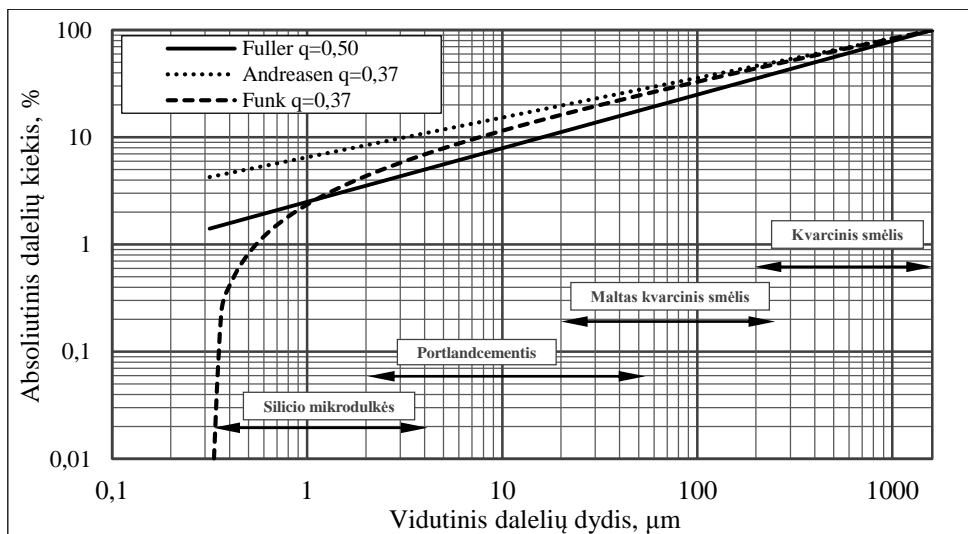
Pagal šį metodą mišinyje panaudotų komponentų kiekiai parenkami taip, kad gautoji granulimetrinė kreivė būtų kuo artimesnė „idealiajai“. Kadangi tai padaryti gana sudėtinga, dažniausiai nurodomos kraštinės ribos, į kurias turi patekti projektuojamo mišinio granulimetrinė kreivė. Dėl skaičiavimo paprastumo šis metodas plačiai naudojamas ir šiomis dienomis. Fuller (1907) buvo pirmasis mokslininkas, pastebėjęs, jog dalelių pagal dydį išsidėstymas nulemia mišinio ir sukietėjusio betono savybes. Pateiktoje matematinėje išraiškoje (**1.1 formulė**) Fuller (1907) įvertino esamą (d) ir didžiausią (d_{\max}) dalelę ($q = 0,5$).

$$P(d) = \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^q; \quad (1.1)$$

Vėliau daugelis mokslininkų bandė papildyti ir patobulinti Fuller (1907) pasiūlytą matematinę išraišką. Andreasen (1930) pasiūlė naudoti dalelių praskyrimo koeficientą (q), kuris gali kisti nuo 0,33 iki 0,50. Andreasen (1930), atlikęs išsamesnius tyrimus, pastebėjo, jog dalelių praskyrimo koeficientas (q) priklauso nuo dalelės charakteristikų (dydžio, formos, tekstūros). Jei naudojamas stambus užpildas, kuriame dominuoja kampuotos dalelės, optimali mišinio granulimetrinė sudėtis bus geriau aprašoma, kai q turės mažesnes vertes, kitaip tariant, mišinyje dominuos didesnis smulkių užpildų kiekis, (**1.2 formulė**) Andreasen (1930).

$$P(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q}; \quad (1.2)$$

Fuller (1907) ir Andreasen (1930) metodai paremti begaliniu smulkesnių dalelių tarp stambesnių pasiskirstymu. Funk (1994) nuomone, realus mišinys turės baigtinį dalelių pagal dydį pasiskirstymą. Todėl pastarasis pasiūlė matematinę išraišką (**1.2 formulė**), kurioje yra įvertinta mažiausioji užpildo dalelė (d_{min}). Funk (1994), atlikęs išsamesnius tyrimus, pastebėjo, jog tankiausia dalelių sanglauda bus pasiekta tuomet, kai dalelių praskyrimo koeficientas (q) bus 0,37. Pagrindinis skirtumas tarp **1.1** ir **1.2 formulių** yra tai, jog Fuller (1907) ir Andreasen (1930) skaičiuodami darė prielaidą, jog dalelių pasiskirstymas pagal dydį yra begalinis, todėl optimali mišinio granulimetrinė kreivė išbrėžia tiesią liniją. Tačiau pagal Funk (1994) pasiūlytą formulę dalelių pagal dydį pasiskirstymas yra baigtinis, todėl kreivė turi išlinkimą.



1.15 pav. Optimalus dalelių pagal dydį pasiskirstymas pagal Fuller, Andreasen ir Funk metodą (sudaryta autoriaus)

Nagrinėtų skaičiavimo metodų vienintelis trūkumas tas, jog skaičiuojant neįvertinama dalelės forma. Vėliau Zheng (1990) pasiūlė įvertinti koeficientą, kuriuo būtų galima įvertinti dalelių formą, tačiau daugelis mokslininkų (Brouwers, 2006; Hunger, 2009; Yu, 2014) nusprendė pasirinkti paprastesnį kelią – priderinti dalelių praskyrimo koeficientą (q) prie savo optimalios granulimetrinės sudėties mišinio. Tai nėra visiškai klaidinga, nes šiuo metu vienoje iš populiariausių nemokamų skaičiavimo programų EMMA (www.elkem.com) nurodyta, jog dalelių praskyrimo koeficientas (q) priklauso nuo gaminamos betono rūšies: įprastinės sudėties betonuose q turėtų svyruoti nuo 0,25 iki 0,30; savaime sutankėjančiuose betonuose – nuo 0,25 iki 0,20, o tankiausia dalelių sanglauda bus pasiekta, kai $q = 0,37$. Šie skaičiavimo metodai leidžia apskaičiuoti optimalios granulimetrinės sudėties mišinį, tačiau konkrečios santykinio mišinio vertės nepateikia.

1.2.2. Tankiausios sanglaudos modeliai

Visi tankiausios sanglaudos modeliai yra labai panašūs. Jiems būdinga tai, kad skirtingo dydžio dalelių geometrinė sąveika aprašoma matematinėmis lygtimis, pagal kurias galima apskaičiuoti santykinį mišinio tankį. Furnas (1931) buvo pirmasis

mokslininkas, pabandęs matematinėmis lygtimis aprašyti dviejų skirtingo dydžių monodispersinių dalelių sąveiką. Pagal pasiūlytą modelį santykinį mišinio tankį galima buvo apskaičiuoti, kai dominuoja didesnio arba mažesnio dydžio monodispersinės dalelės. Westman (1930) pasiūlė santykinio mišinio tankio skaičiavimo algoritmą, nepriklausomai nuo to, kiek skirtingo dydžio dalelių dominuoja mišinyje. Vėliau Schwanda (1966) pastebėjo, kad santykinis mišinio tankis labai priklauso nuo to, kaip dalelės sąveikauja, todėl pasiūlė tris skirtingus dalelių sąveikos atvejus. Schwanda (1966) modelis vėlesniame skyriuje bus panagrinėtas išsamiau. Vėliau optimalios granulimetrinės kreivės skaičiavimai buvo sujungti su santykinio mišinio tankio skaičiavimo metodais. Paprastai, priklausomai nuo naudotų komponentų, betono mišinio santykinis tankis gali kisti nuo 0,55 iki 0,80 (Sobolev 2007).

Šiuo metu sukurtos įvairios kompiuterinės programos, kuriomis galima atlikti ne tik betono mišinio sudėties projektavimą, bet ir parinkti užpildų formą, tekstūrą, įvertinti vandens įtaką dalelių išsidėstymui, prognozuoti dalelių išsidėstymą maišymo metu, cemento hidratacijos parametrus, likusį poringumą, laidumą skysčiams, susitraukimo deformacijas ir kitas savybes (Ye, 2007). Viena iš tokių programų yra HYMOSTRUC 3D, tačiau plačiau šioje disertacijoje nebus nagrinėjama.

1.2.3. Schwanda tankiausios dalelių sanglaudos modelis

Pagal šį modelį skaičiuojamas tuštumų santykis (U). Pagal Schwanda (1966) metodą mišinyje esančios skirtingo dydžio dalelės yra sugrupuojamos, o atskiros dalelių grupės lyginamos tarp viena eile didesnės dalelių grupės. Tarp atskirų grupių gali būti skirtinga dalelių sąveika, dėl kurios likęs tuštumų santykis taip pat skirsis.

$$U = \frac{\varepsilon}{\alpha}; \quad (1.3)$$

Maksimalus tuštumų santykis (**1.3 formulė**, Schwanda (1966)) yra tiesiogiai proporcingas minimaliam tuštumų kiekiui (ε) ir atvirkščiai proporcingas santykiniam mišinio tankiui (α). Pagal Schwanda metodą galimi trys tarpusavio dalelių sąveikos atvejai.

1 atvejis. Šiuo atveju mišinyje dominuoja stambios dalelės, todėl smulkios dalelės gali lengvai užpildyti tarpus tarp stambių dalelių. Maksimalus tuštumų santykis (U) apskaičiuojamas pagal **1.4 ir 1.5 formules** (Schwanda, 1966):

$$U_{case1} = \frac{\varepsilon_l - \phi_s}{\phi_s + \phi_l}; \quad (1.4)$$

$$U_{case1} = U_l - (U_l + 1)r_s; \quad (1.5)$$

čia:

ε_l – sugrupuotų stambesnių dalelių tuštumų skaičius (poringumas);

ϕ_s – sugrupuotų smulkesnių dalelių tūrinė dalis;

ϕ_l – sugrupuotų stambesnių dalelių tūrinė dalis;

U_l – stambesnių dalelių tuštumų santykis;

r_s – smulkesnių dalelių tūrinė dalis.

2 atvejis. Šiuo atveju dominuoja smulkios dalelės, o mišinyje sudaryta išretėjusi dalelių sanglauda, todėl stambios dalelės „plaukioja“ tarp smulkių dalelių. Maksimalus tuštumų santykis apskaičiuojamas pagal **1.6 ir 1.7 formules** (Schwanda, 1966):

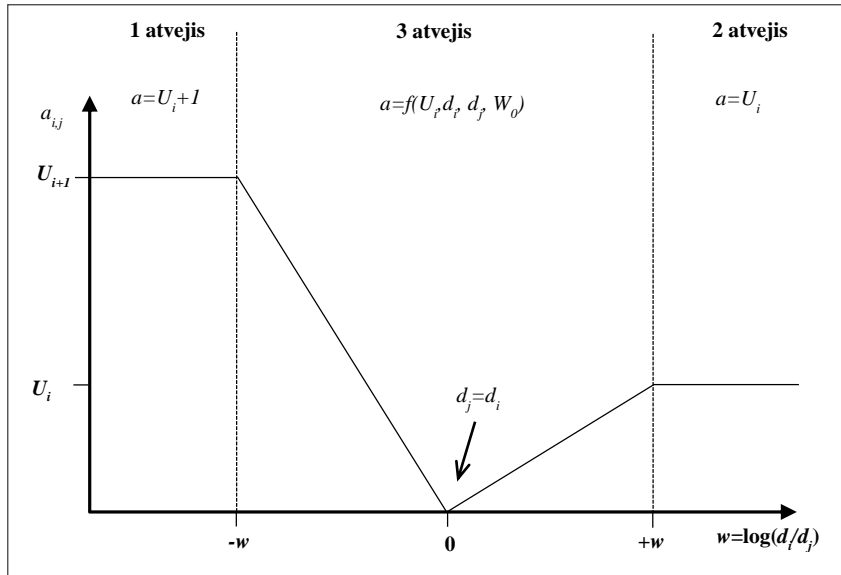
$$U_{case2} = \frac{\varepsilon_s}{\phi_l + \phi_s}; \quad (1.6)$$

$$U_{case2} = U_s - U_s \cdot r_s; \quad (1.7)$$

čia:

ε_s – sugrupuotų smulkių dalelių tuštumų skaičius;

U_s – smulkesnių dalelių tuštumų santykis.



1.16 pav. Koeficiento a_{ij} įvertinimas, priklausomai nuo dalelių tarpusavio sąveikos (Schwanda, 1966)

3 atvejis. Šiuo atveju smulkios dalelės yra per didelės, kad užpildytų tarpus tarp stambesnių dalelių, todėl tinkamas dalelių pagal dydį pasiskirstymas neįmanomas, o bendras sistemos tūris ir tuštumų skaičius padidėja (**1.16 paveikslas**). Padidėjęs tuštumų santykis priklauso nuo dalelių tarpusavio sąveikos ir yra išreiškiamas koeficientu a_{ij} . Koeficiento a_{ij} dydis priklauso nuo sąveikaujančių dalelių atvejo ir sąveikaujančių dalelių skersmenų santykio (w):

$$w = \log\left(\frac{d_i}{d_j}\right); \quad (1.8)$$

$$\left\{ -w \leq \log\left(\frac{d_i}{d_j}\right) \leq +w \right\}; \quad (1.9)$$

čia:

d_i – dominuojančių sugrupuotų dalelių skersmuo (m);

d_w – sugrupuotų dalelių skersmuo, dėl kurių bendras sistemos tūris padidėja (m);

d_j – sugrupuotų nedominuojančios klasės dalelių skersmuo, dėl kurių bendras sistemos tūris padidėja (m).

Įvertinant tris galimus dalelių tarpusavio sąveikos atvejus, maksimalus tuštumų santykis (U) mišinyje gali būti aprašomas **1.10 formule** (Schwanda, 1966):

$$U_{\max} = U_i - \sum_{j=1}^n a_{i,j} \cdot r_j; \quad (1.10)$$

čia:

U_i – dominuojančių dalelių tuštumų santykis;

$a_{i,j}$ – koeficientas, įvertinantis tuštumų padidėjimą;

r_j – dalelių tūrinė dalis, dėl kurių bendras sistemos tūris padidėja.

Tuomet santykinis mišinio tankis apskaičiuojamas pagal **1.11 formulę** (Schwanda, 1966):

$$\alpha = \frac{1}{1 + U_{\max}}; \quad (1.11)$$

1.3. YSB struktūra ir jos formavimas

Pagal daugiastuktūrę medžiagos teoriją (Yazıcı, 2010) galima teigti, kad daugelis betono savybių turi funkcinę priklausomybę tarp makrolygmens (nuo panaudotų komponentų ir jų tarpusavio sąveikos) ir mikrolygmens (hidratacijos naujadarų, cheminių ir aktyviųjų mineralinių priedų). Gana plačiai pagrindinių komponentų įtaka ir jų tarpusavio sąveika betono savybėms makro-, mezolygmeniu buvo panagrinėta ankstesniuose literatūros analizės skyriuose, todėl šiame skyriuje daugiau dėmesio bus skiriama betono mikro- ir nanostruktūros nagrinėjimui.

Manoma, jog daugelis betono savybių, tokių kaip stiprumas, trapumas, elastingumas, pralaidumas skysčiams, susitraukimo deformacijos ir kt., priklauso nuo cemento hidratacijos metu susidariusių naujadarų (Samiei, 2015). Hidratacijos metu susidariusių naujadarų struktūra ir savybės labai priklauso nuo V/C santykio, cemento smulkumo, granulimetrinės sudėties, kietinimo temperatūros, panaudotų cheminių ir aktyviųjų mineralinių priedų kiekio ir kitų veiksnių (Jabri, 2014). Esminiai struktūros skirtumai tarp įprastinės sudėties ir YSB betono pateikti **1.17 paveiksle**. Galima pastebėti, jog YSB makro-, mikrostruktūra ir hidratacijos metu susidariusių naujadarų morfologija labai skiriasi nuo įprastinės sudėties betono, todėl tikslinga YSB struktūrą, struktūros parametrus ir struktūroje vykstančius cheminius procesus panagrinėti detaliau.

1.3.1. Klinkerio mineralų hidratacija

Portlandcementis paprastai susideda iš klinkerio ir iki 5 % gipso. Gipsas naudojamas rišimosi greičiui reguliuoti. Klinkeryje dominuoja CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , taip pat aptinkama nedaug MgO , TiO_2 , SO_3 , Na_2O , K_2O ir pan. Taylor (1997) pasiūlė šiuos

oksidus suskirstyti į keturis pagrindinius mineralus: trikalciosilikatas – $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (sutrumpintai – C_3S); dikalciosilikatas – $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (sutrumpintai – C_2S); trikalcioaluminatas – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (sutrumpintai – C_3A) ir tetrakalcioaluminatas – $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (sutrumpintai – C_4AF), kurių apytikslius kiekius galima apskaičiuoti pagal **1.12–1.15 formules** (Taylor, 1997).

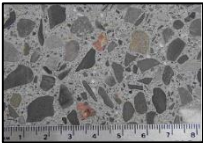
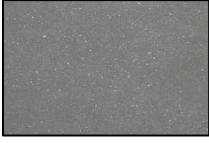
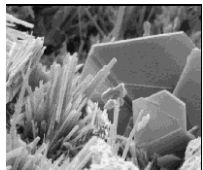
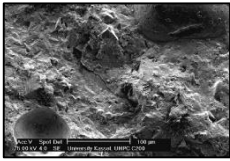
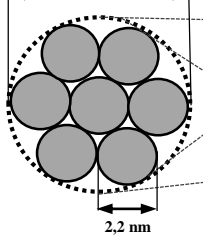
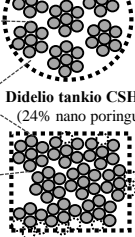
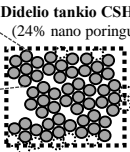
$$x_{\text{C}_3\text{S}} = 4,07 \cdot x_{\text{CaO}} - (7,60 \cdot x_{\text{SiO}_2} + 6,72 \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 1,43 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + 2,85 \cdot x_{\text{SO}_3}) \quad (1.12)$$

$$x_{\text{C}_2\text{S}} = 2,87 \cdot x_{\text{SiO}_2} - 0,754 \cdot x_{\text{C}_3\text{S}} \quad (1.13)$$

$$x_{\text{C}_3\text{A}} = 2,65 \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 1,69 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (1.14)$$

$$x_{\text{C}_4\text{AF}} = 3,04 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (1.15)$$

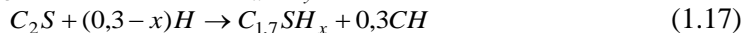
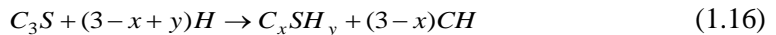
Į klinkerio sudėtį esantys pagrindiniai oksidai ir jų kiekiai gali būti identifikuoti ir apskaičiuoti taikant rentgeno spinduliuotės fluorescencinį metodą (angl. *X-Ray fluorescence*), išskirti junginius tirpinant etilendiaminetetraacto rūgštyje (angl. *ethylenediaminetetraacetic acid*) ir naudojant atominės absorbcijos spektrometrijos metodą (angl. *atomic absorption spectrophotometry*). Mineralinė sudėtis gali būti identifikuota taikant šviesos mikroskopą (angl. *light microscopy*), rentgeno spinduliuotės spektroskopinę ir fluorescencinę analizę. Priklausomai nuo taikyto instrumentinės analizės metodo, klinkerio mineraloginė sudėtis gali kiek skirtis, todėl įvairių autorių pasiūlytos klinkerio mineraloginės sudėties skaičiavimo formulės taip pat gali šiek tiek skirtis, tad yra įvairių skaičiavimo modifikacijų.

LYGMUO	ĮPRASTINĖS SUDĖTIES BETONAS	YPAČ STIPRUS BETONAS	BŪDINGA CHARAKTERISTIKA
Makro/Mezo ($\geq 10^{-3}$ m) (Betonas, skiedinys)			Įprastinės sudėties betonai: dominuoja stambus ir smulkus užpildas, oro poros, sąlyčio zona tarp cemento akmens ir užpildo. Ypač stiprus betonai: nėra stambaus užpildo, sumažėjęs makroporingumas, dominuoja smulkus užpildas, sąlyčio zona.
Mikro (10^{-4} – 10^{-6} m) (Cemento tešla, cemento akmuo)			Įprastinės sudėties betonai: dominuoja nehidratavę klinkerio grūdėliai, hidratacijos naujadarai (CSH gelis, CH ir etringitas), dominuoja kapiliarinės poros. Ypač stiprus betonai: dominuoja nehidratavę klinkerio grūdėliai (~50%), hidratacijos naujadarai (CH ir etringitas), įsikomponavę į CSH struktūrą, oro poros.
Nano (10^{-9} – 10^{-10} m) (CSH struktūra)	CSH dalelė (18% nano poringumas) 	Mažo tankio CSH dalelė (37% nano poringumas)  Didelio tankio CSH dalelė (24% nano poringumas) 	Ypač stipriame betone dominuoja didesnis kiekis didelio tankio CSH, tačiau tiek įprastinės sudėties, tiek ypač stipraus betono nanostruktūra gali būti apibūdinama: skirtingomis modifikacijomis CSH, nėra vieningos nuomonės dėl cemento struktūros modelio (Powers; Feldman and Serdeda; Jennings), dominuoja gelinis poringumas.

1.17 pav. Pagrindiniai struktūros skirtumai tarp įprastinės sudėties ir ypač stipraus betono (sudaryta autoriaus)

Cemento hidratacijos metu vieni klinkerio mineralai gali turėti įtakos kitų mineralų hidratacijos procesui, todėl tikslinga panagrinėti atskirų gryno klinkerio fazių hidratacijos procesus ir jų įtaką struktūros formavimuisi. Pagal hidratacijos kinetiką, klinkerio mineralus galima užrašyti: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$.

C_3S ir C_2S mineralų hidratacija. Hidratacijos metu (**1.16 ir 1.17 formulės**) (Taylor, 1997) gaunami kalcio hidrosilikatai (CSH) ir kalcio hidroksidas (CH). CSH neturi apibrėžtos stochiometrijos, tačiau manoma, kad daugelis cemento akmens savybių priklauso nuo hidratacijos metu susidariusių CSH struktūros, kristališkumo laipsnio, C/S santykio, morfologijos ir CSH struktūroje esančių porų kiekio. C/S santykis cemento sistemose paprastai svyruoja nuo 0,7 iki 2,0. Taylor (1997) pasiūlė CSH suskirstyti pagal C/S santykį į dvi rūšis – CSH (I), kai $C/S < 1,5$, ir CSH (II), kai $C/S > 1,5$. Mažėjant C/S santykiui, vidutinis CSH grandinės ilgis didėja. Didėjant CSH grandinės ilgiui, atstumas tarp CSH sluoksnių mažėja, todėl gaunami tankesnės struktūros kalcio hidrosilikatai (Bhat, 2011). Tačiau paprastai cemento sistemose gali egzistuoti kelių skirtingų grupių CSH (Volastonito, tobermorito, CSH (I) ir CSH (II)), kurių struktūra gali kisti nuo amorfinės iki kristalinės.



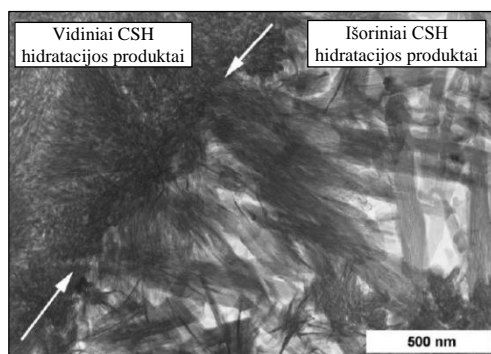
čia:

jei $x \in (0,5; 1,5)$ ir $y \in (0,5; 2,5)$, tai susidarys CSH(I);

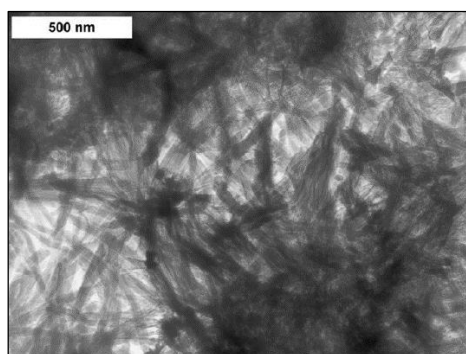
jei $x \in (1,5; 2,0)$ ir $y \in (1,0; 4,0)$, tai susidarys CSH(II).

Richardson (2004), tirdamas C_3S ir C_2S mineralus ir taikydamas transmisijos elektronų mikroskopijos metodą (angl. *transmission electron microscopy*), išskyrė dvių tipų CSH, kuriuos pavadino vidiniais ir išoriniais CSH produktais (**1.18 ir 1.19 paveikslai**). Šie hidratacijos naujadarai atitinkamai sutampa pagal klasikinę Taylor (1997) pasiūlytą klasifikaciją CSH (I) ir CSH (II). Richardson (2004) pastebėjo, jog vidiniai ir išoriniai CSH produktai pasižymi skirtinga struktūra ir morfologija. Richardson (2004) nustatė, jog C_3S mineralo hidratacijos metu susidariusių vidinių CSH naujadarų produktų dalelių dydis kietinant 20 °C temperatūroje yra apie 4–8 nm, o kietinant aukštesnėje temperatūroje sumažėja iki 3–4 nm. C_2S mineralas hidratacijos metu pagamina didesnę kiekį tankios struktūros CSH (I) naujadarų, tačiau šio mineralo hidratacijos kinetika yra žymiai lėtesnė.

Įprastinėmis aplinkos sąlygomis cemento hidratacijos metu gali susiformuoti dvi pagrindinės CSH fazės: CSH (II) ir CSH (I). Jennings (2007) nustatė, kad CSH (II) tankis svyruoja nuo 1700 kg/m³ iki 2050 kg/m³, o CSH (I) tankis – nuo 2000 kg/m³ iki 2300 kg/m³. Šis tankis daugiausia priklauso nuo kietinimo sąlygų ir CSH struktūroje esančio poringumo. Thomas (2010) nustatė, jog 1,1 nm tobermorito ir 1,4 nm tobermorito tankis atitinkamai yra 2,48 g/cm³ ir 2,23 g/cm³, o tai labai priklauso nuo V/C santykio ir panaudotų aktyviųjų mineralinių priedų kiekio. C_3S ir C_2S mineralų hidratacijos metu susiformuoja kalcio hidroksidas (apie 20–25 % nuo sureagavusio C_3S ir C_2S kiekio), kurio kristalai yra šešiakampio formos. Manoma, jog hidratacijos metu susidarę kalcio hidroksido kristalai neturi teigiamos įtakos cemento akmens stiprumui. CH yra tirpūs, o ištirpę gali sudaryti šarminį tirpalą, kurio pH gali pakilti iki 13,75.

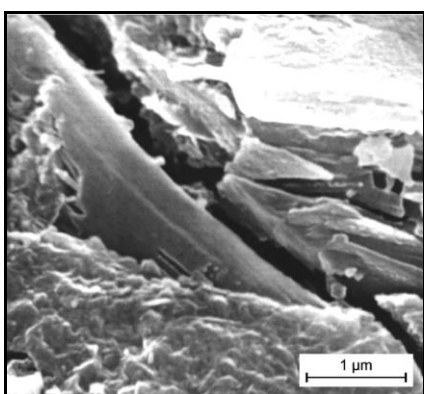


1.18 pav. C_3S minerale susiformavę išoriniai ir vidiniai CSH produktai ($V/C = 0,40$; kietinimo trukmė – 8 metai, temperatūra – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Richardson, 2004)

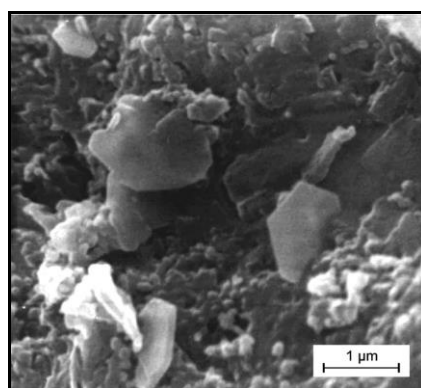


1.19 pav. $\beta\text{-}C_2S$ minerale susiformavę tankūs išoriniai CSH produktai ($V/C = 0,40$; kietinimo trukmė – 3 mėnesiai, temperatūra – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Richardson, 2004)

Cementinėje matricoje aptinkamų CH kristalų storis paprastai būna apie $10\text{ }\mu\text{m}$, o ilgis gali siekti iki kelių šimtų mikrometrų, tačiau labai priklauso nuo V/C santykio, kietinimo sąlygų, panaudotų aktyviųjų mineralinių priedų ir kitų veiksnių (Morsy, 2005). Slamečka (2002) nustatė, kaip vandens ir cemento santykis (V/C kito nuo 0,19 iki 0,50) veikia hidratacijos metu susidariusių naujadarų morfologiją (**1.20 ir 1.21 paveikslai**). Eksperimento metu pastebėta, jog didėjant V/C santykiui susiformuoja didesni CH kristalai. CH kristalai, augdami cementinėje matricoje, gali suformuoti mikroplyšius, dėl kurių cementinės matricos stiprumas mažėja, tačiau mažėjant V/C santykiui CH kristalų dydis taip pat mažėja, todėl gali homogeniškai pasiskirstyti tarp hidratacijos metu susidariusių naujadarų ar uždaroje porose. Paprastai betonuose CH linkę pasiskirstyti cementinės matricos ir panaudotų užpildų sąlyčio zonoje. CH kristalų kiekis paprastai mažinamas naudojant aktyviuosius mineralinius priedus.



1.20 pav. Portlandcemenčio hidratacijos metu susiformavę CH kristalai augdami suformuoja cementinėje matricoje mikroplyšius ($V/C = 0,40$) (Slamečka, 2002)



1.21 pav. CH kristalai, tolygiai pasiskirstę cementinėje matricoje ($V/C = 0,25$) (Slamečka, 2002)

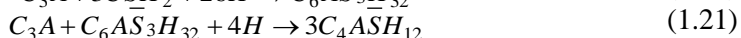
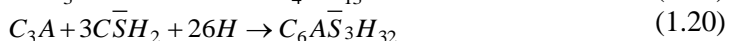
C_3A ir C_4AF mineralų hidratacija. C_3A mineralas yra pats reaktyviausias iš visų į klinkerio sudėtį įeinančių mineralų, todėl hidratacijos metu išsiskiria didžiausias šilumos kiekis. C_3A hidratacijos metu pagrindinis susiformavęs naujadaras yra etringitas. Etringito

struktūra gali būti šešiakampio ar kubo formos, tačiau esant pakankamam gipso kiekiui gali išaugti iki pailgų adatos formos kristalų, kurių plotis yra keletas mikrometrų, o ilgis gali kisti nuo 10 μm iki 100 μm. Etringito savybės labiausiai priklauso nuo susidariusios etringito modifikacijos. Susidariusio etringito modifikacija labiausiai priklauso nuo cemento esančio gipso ($\overline{C}\overline{S}H_2$) kiekio (**1.9 lentelė**), CSH struktūros, V/C santykio, cheminių ir aktyviųjų mineralinių priedų kiekio, temperatūros, pH terpės ir pan. Ankstyvasis cemento akmens stiprumas daugiausia priklauso nuo susidariusio etringito kristalų dydžio ir kiekio. Etringito kristalai cemento sistemoje yra stabilūs tik tol, kol yra nesureagavęs gipsas. Etringito indėlis cemento akmens gniuždymo stipriui, lyginant su CSH, yra labai menkas.

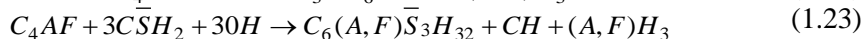
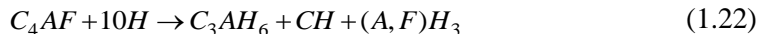
1.9 lentelė. Gipso kiekio įtaka C_3A hidratacijos naujų naujų susidarymui (Taylor, 2014)

$\overline{C}\overline{S}H_2/C_3A$	Hidratacijos metu susiformavę naujų naujų
>3	Trisulfatas ir gipsas
3	Trisulfatas
1,0–3,0	Trisulfatas ir monosulfatas
1	Monosulfatas
<1	Monosulfatas ir C_4AH_{13} , C_2AH_8 arba $C_3A(\overline{C}\overline{S},CH)H_{12}$
0	C_3AH_6

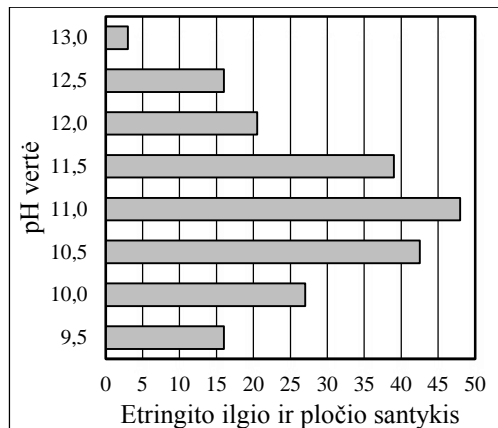
C_3A mineralo hidratacijos metu galimos keturios pagrindinės reakcijos, kurių metu susiformuos skirtingos modifikacijos etringito kristalas: reaguojant tik su vandeniu (**1.18 formulė**) (Taylor, 1997); reaguojant su kalcio hidroksidu (**1.19 formulė**) (Taylor, 1997), reaguojant su gipsu (**1.20 formulė**) ir su susidariusiu etringitu (**1.21 formulė**) (Taylor, 1997). **1.18 formulės** (Taylor, 1997) reakcijos metu susiformuoja nestabilūs šešiakampio formos kristalai, kurie vėliau linkę persikristalizuoti į kubo formą. Jei sudėtyje nėra gipso, o C_3A reaguoja su kalcio hidroksidu (**1.18 formulė**) (Taylor, 1997), tokioje cemento sistemoje gali prasidėti netikras rišimasis ir toks mišinys greitai praranda savo technologines savybes. C_3A reaguojant su gipsu susidaro pailgi adatos formos etringito kristalai, kurių tankis kinta nuo 1700 kg/m³ iki 1800 kg/m³. Šie kristalai sudaro gaubiamąjį sluoksnį apie C_3A mineralą ir stabdo hidratacijos procesą (**1.19 formulė**) (Taylor, 1997). Kristalai auga tol, kol sudėtyje yra likę nors kiek nesuragavusio gipso. Kai gipso nebelieka, etringitas tampa nestabilus, todėl pradeda reaguoti su likusiu C_3A mineralu ir persiformuoja į monosulfatą. Monosulfato kristalai yra stabilūs tik tuomet, jei cemento sistemoje nėra gipso; atsiradus gipsui monosulfato kristalai tampa nestabilūs ir persikristalizuoja atgal į etringito kristalus. Etringito kristalai užima apie du kartus didesnę tūrį negu monosulfato kristalai. Todėl grįžtamosios reakcijos metu gali būti pažeista cemento sistemos matrica. Etringito kristalai taip pat tampa nestabilūs ir persikristalizuoja į monosulfato kristalus ir tuomet, jei cemento akmuo yra kietinamas aukštesnėje kaip 70 °C temperatūroje.



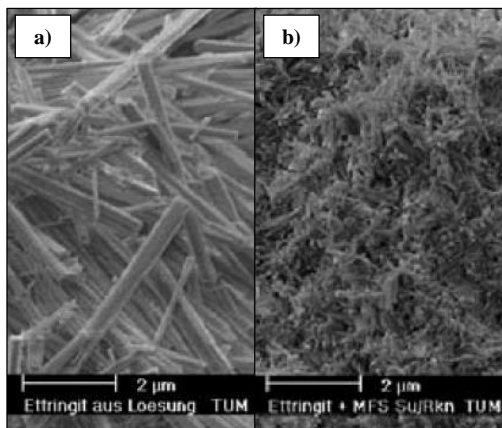
C₄AF mineralo hidratacijos metu gali susiformuoti etringitas, kalcio hidroksidas ir hidrogranatas. Reakcija yra kur kas lėtesnė už C₃A mineralo. Hidrogranatas disertacijoje plačiau nubūs nagrinėjamas.



Stark (2011), tyrinėdamas etringito kristalų stabilumą šarminėje aplinkoje, pastebėjo, jog, didėjant pH vertei, etringito kristalų ilgis proporcingai mažėja ir gali tapti mikrokristalinės formos arba net visai nesusiformuoti (**1.22 paveikslas**).



1.22 pav. Šarminės aplinkos įtaka etringito kristalų dydžiui (Stark, 2011)

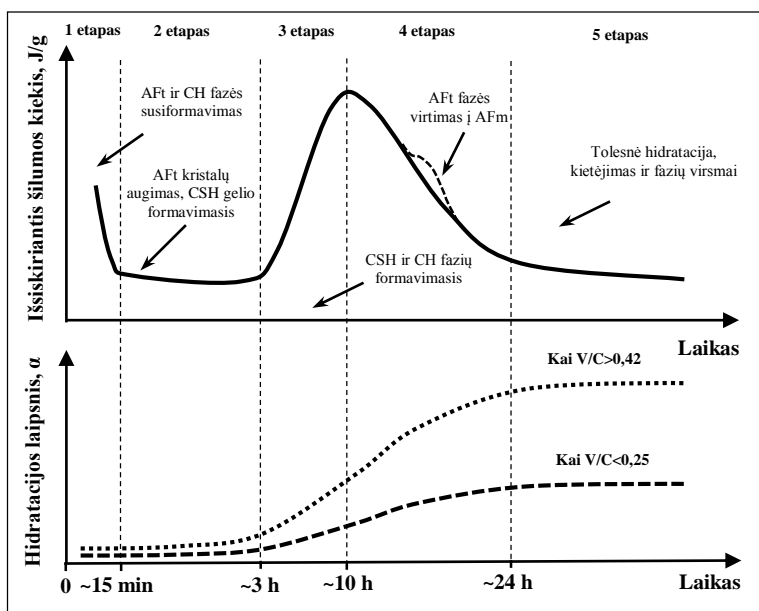


1.23 pav. Etringito kristalai cemento sistemoje: a – be superplastiklio; b – su superplastikliu (Plank, 2007)

Bouzabata (2012) patvirtino prielaidą, jog etringitas šarminėje terpėje yra nestabilus, todėl aukštoje šarminėje terpėje ($pH \geq 13,2$) gali nesusiformuoti, tačiau jei po kurio laiko iš cemento akmens bus išplauti šarmai, tokioje struktūroje gali būti palankios sąlygos susidaryti uždelstam etringitui susiformuoti, kuris gali suardyti cementinę matricą. Plank (2007) pastebėjo, jog naudojant polikarboksilato eterio pagrindu sukurtus superplastiklius cemento sistemoje etringito kristalų dydis kur kas sumažėja (**1.23 paveikslas**). Taip pat nustatyta, jog etringito kristalai pasižymi gerokai mažesniu zeta potencialu nei C₃A ar C₄AF mineralai. Tai reiškia, jog C₃A ir C₄AF mineralai absorbuoja gerokai didesnę superplastiklyje esančių polimerų kiekį nei etringito kristalai, todėl, prieš dozuojuant superplastiklį, tikslinga palaukti kelias minutes, kol susiformuos etringito kristalai.

1.3.2. Portlandcemenčio hidratacijos kinetika

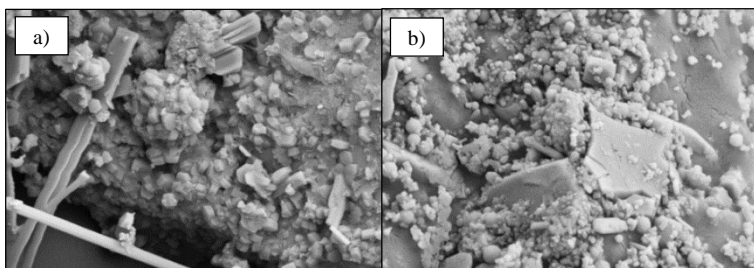
Portlandcemenčiui hidratuojantis vyksta egzoterminė reakcija ir išsiskiria tam tikras šilumos kiekis. Šį išsiskiriantį šilumos kiekį patogu stebėti taikant mikrokolorimetrijos analizės metodą. Kadangi atskiros klinkerio fazės pasižymi skirtinga hidratacijos kinetika, portlandcemenčio hidratacijos procesui yra būdingi 3–5 charakteringi etapai, kuriuos tikslinga panagrinėti nuodugniau (**1.24 paveikslas**).



1.24 pav. Portlandcemenčio hidratacijos kinetika (sudaryta autoriaus)

1 etapas. Šis etapas dar gali būti vadinamas tirpimo periodu. Tirpimo periodo pradžia laikoma tuo metu, kai cementas paveikiamas vandeniu. Paveikus cementą vandeniu reakcija vyksta akimirksniu, o reaktyviausias cemento mineralas (C_3A) pradeda intensyviai tirpti ir išskirti didelį šilumos kiekį. Šiame etape taip pat gali reaguoti ir C_3S mineralas. Todėl šiam etapui būdinga tai, jog susiformuoja etringitas ir kalcio hidroksidas. Šis etapas gali trukti iki 15 min, o išsiskiriantis šilumos kiekis priklausys nuo C_3A ir C_2S ištirpusių mineralų kiekio.

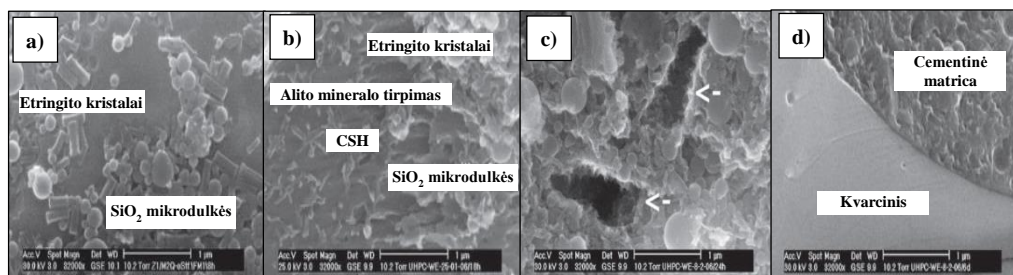
2 etapas. Šis etapas dar gali būti pavadintas indukciniu periodu. Šiam etapui būdinga, jog reakcijos greitis sulėtėja, o išsiskiriantis šilumos kiekis sumažėja. Reakcijos greitis sulėtėja, nes vyksta tolesnis etringito kristalų augimas, kuris sudaro sluoksnį aplink cemento grūdėlius ir neleidžia vandeniui reaguoti su cementu. Indukcinis periodas paprastai trunka apie kelias valandas. Sobolev (2006), tirdamas cemento akmens hidratacijos procesą ($V/C = 0,30$), pastebėjo, jog jau po 1 valandos gali susiformuoti gana didelis kiekis etringito ir portlandito kristalų, tačiau panaudojant SiO_2 nanodulkes, šių kristalų dydis ir kiekis sumažėja (1.25 paveikslas).



1.25 pav. Hidratacijos naujadarai po 1 h: a – be priedų; b – su 8 % SiO_2 nanodulkių ($V/C = 0,30$) (Sobolev, 2006)

3 etapas. Šis etapas dar gali būti vadinamas greitėjimo periodu. Būdinga tai, jog šiuo periodu suaktyvėja C_3S mineralo reakcija, taip pat reaguoja C_3A mineralas ir gali pradėti reaguoti nedidelis kiekis C_2S mineralo. C_3A toliau reaguoja su likusiu gipsu, formuodamas etringito kristalus. Šiame etape jau yra susiformavęs pakankamas CSH kiekis, todėl cemento akmuo įgauna tam tikrą stiprį, taip pat pradeda formuotis mikrostruktūra, atsiranda porų. Land (2012) pateikė prielaidą: jei mišinyje bus panaudota silicio mikrodulkių, tai šiame etape jos sudarys hidratacijos centrus, kurie paspartins portlandcemenčio hidratacijos procesą.

4 etapas. Šis etapas dar gali būti vadinamas lėtėjimo periodu. Iki šio etapo jau būna susidariusi didžioji CSH dalis, todėl tolesnis hidratacijos greitis labiausiai priklausys nuo difuzijos proceso ir C_2S mineralo hidratacijos. Jei cemento akmenyje yra sureagavęs visas gipsas, tada šioje stadijoje etringitas virsta į monosulfatą.



1.26 pav. Cemento akmens ($V/C = 0,22$) mikrostruktūros vystymasis: a) po 8 h; b) 18 h; c) 24 h ir d) 6 parų (Möser, 2008)

Möser (2008), tyrinédamas, kaip vystosi ypač stipraus betono mikrostruktūra (**1.26 paveikslas**), pastebėjo, jog po 8 h cemento akmens hidratacijos (a) susiformuoja tik etringito kristalai, kurių dydis – iki 400 nm. Dėl susidariusių etringito kristalų ir panaudoto superplastiklio C_3S mineralo hidratacija nevyksta, todėl CSH fazė nesusiformuoja. Po 18 valandų (b) susiformuoja pailgos adatų formos kalcio hidrosilikatų užuomazgos. CSH užuomazgų dydis – iki 200 nm, o tirpstančio alito mineralo vietoje pradeda formuotis kavernos. Po 24 valandų (c) cementinė matrica labai sutankėja, o ištirpusio klinkerio vietose susiformuoja oro poros. Po 6 parų (d) cementinė matrica tampa be galo tanki, todėl vizualiai identifikuoti hidratacijos metu susidariusius naujadarus ganėtinai sudėtinga. Manoma, jog po 6 parų cemento hidratacijos metu susiformavę produktai yra įsiterpę į cementinę matricą, todėl vizualiai yra sunkiai identifikuojami.

5 etapas. Šiame etape vyksta tolesnis cemento hidratacijos procesas, kuris labiausiai priklauso nuo panaudotų aktyviųjų mineralinių priedų. Aktyvieji mineraliniai priedai gali pradėti reaguoti su kalcio hidroksidu (pucolaninė reakcija) ir sudaryti antrinės hidratacijos mažo bazingumo kalcio hidrosilikatus.

1.3.3. CSH struktūros modeliai

Cemento hidratacijos metu didžiąją hidratacijos naujadarų dalį užima CSH naujadarai. Cemento akmens stiprumas ir susitraukimo deformacijos daugiausia priklauso nuo susiformavusios CSH struktūros. Yra pasiūlyta daugybė įvairių modelių, kuriais bandyta paaiškinti CSH nanostruktūrą, tačiau iki galo ji dar vis nėra aiški. Kadangi

manoma, jog daugelis cemento akmens savybių priklauso būtent nuo susiformavusios CSH struktūros, tikslinga CSH nanostruktūros modelius panagrinėti išsamiau.

Powers (1946) buvo pirmasis mokslininkas, pasiūlęs koloidinės CSH struktūros modelį (**1.27 a paveikslas**). Šis pasiūlytas modelis yra gana paprastas, tačiau suteikia daug informacijos apie CSH struktūrą, todėl tapo etalonu kuriant vėlesnius CSH struktūros modelius. Pagal pasiūlytą modelį galima apskaičiuoti gelio ir kapiliarinių porų bei nesureagavusio cemento tūris (**1.24–1.26 formulės**) (Powers, 1946), o atstumas tarp atskirų CSH sluoksnių yra pastovus – apie 1,8 nm.

$$V_{gel} = \frac{0,68\alpha}{\frac{V}{C} + 0,32}; \quad (1.24)$$

$$V_{kap} = \frac{\frac{V}{C} - 0,36\alpha}{\frac{V}{C} + 0,32}; \quad (1.25)$$

$$V_{n.c.} = \frac{0,32(1-\alpha)}{\frac{V}{C} + 0,32}; \quad (1.26)$$

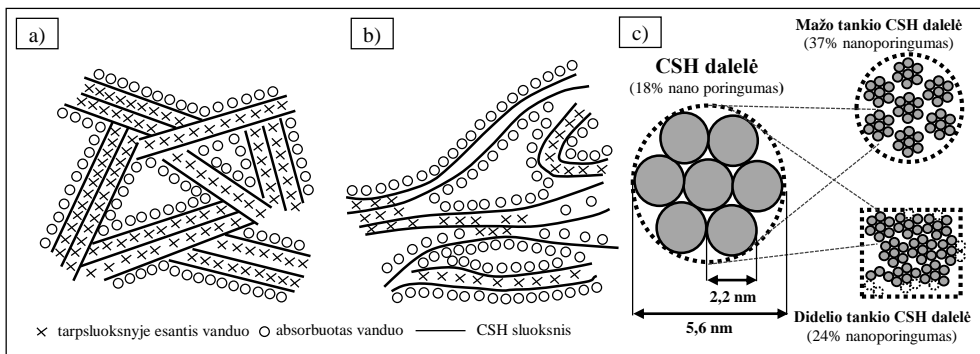
čia:

V_{gel} , V_{kap} , $V_{n.c.}$ – gelio, kapiliarinių porų ir nesureagavusio cemento tūris;

V/C – vandens ir cemento santykis;

α – cemento hidratacijos laipsnis.

Feldman (1968) papildė Powers (1946) pasiūlytą modelį (**1.27 b paveikslas**) ir pasiūlė prielaidą, jog CSH struktūra yra sluoksniuota, sluoksnių storis nėra pastovus, o atstumas tarp CSH sluoksnių gali kisti nuo 0,5 nm iki 2,5 nm. Sluoksnio storis labiausiai priklauso nuo absorbuoto vandens kiekio. Šie du autoriai taip pat pirmieji pasiūlė prielaidą, jog nuo CSH struktūros labiausiai priklauso cemento akmens valkšnumo ir susitraukimo deformacijos.



1.27 pav. CSH struktūros modeliai: a – Powers; b – Feldman; c – Jenings modeliai

Pagal Powers (1946) struktūros modelį, tam, kad visas cementas sureaguotų (t. y. $\alpha = 1,0$), vandens ir cemento santykis turėtų būti $V/C \geq 0,42$. Brouwers (2004) savo tyrimuose pastebėjo, jog ši prielaida yra teisinga tik tuo atveju, jei cemento akmuo yra laikomas

uždromis sąlygomis, kai į cemento sistemą negali patekti papildomai vandens. Tačiau atlikdamas eksperimentus Brouwers pastebėjo, jog jei vanduo gali migruoti pro sukietėjusio cemento akmens struktūrą, tai visas cementas gali sureaguoti ir esant mažesnei vandens ir cemento santykio vertei ($V/C = 0,27$), antraip vandens ir cemento santykis turėtų būti $V/C \geq 0,42$. Pagal Brouwers pasiūlytą modelį (2005) galima apskaičiuoti hidratacijos naujadarų ($\varphi_{h.n.}$), nesureagavusio cemento ($\varphi_{n.c.}$), nesureagavusio vandens ($\varphi_{n.v.}$), cheminio susitraukimo ($\varphi_{h.s.}$) ir kapiliarinio poringumo ($\varphi_{k.p.}$) tūrinės koncentracijas (**1.27–1.32 formulės**).

$$\varphi_{h.n.} = \frac{(0,639 + 0,013k)\alpha}{0,32 + \frac{V}{C}} \quad (1.27)$$

$$\varphi_{n.c.} = \frac{0,320(1 - \alpha)}{0,320 + \frac{V}{C}} \quad (1.28)$$

$$\varphi_{n.v.} = \frac{\frac{V}{C} + (0,400 + 0,014k)\alpha}{0,320 + \frac{V}{C}} \quad (1.29)$$

$$\varphi_{h.s.} = \frac{0,081 + 0,001k\alpha}{0,320 + \frac{V}{C}} \quad (1.30)$$

$$\varphi_{h.n.} + \varphi_{n.c.} + \varphi_{n.v.} + \varphi_{h.s.} = 1 \quad (1.31)$$

$$\varphi_{k.p.} = \varphi_{n.v.} + \varphi_{h.s.} = \frac{\frac{V}{C} - (0,319 + 0,013k)\alpha}{0,320 + \frac{V}{C}} \quad (1.32)$$

čia:

k – karbonizavusio cemento akmens kiekis, %;

V/C – vandens ir cemento santykis;

α – hidratacijos laipsnis.

Powers (1946) modelis buvo dar labiau patobulintas, kai Amen (2011) pasiūlė, apskaičiuojant gelio ir tuštumų santykį, prognozuoti betono su labai mažu vandens ir cemento santykiu ($V/C = 0,23–0,35$) gniuždymo stiprį. Skaičiuojant gelio tuštumų santykį daroma prielaida, jog 1 ml cemento hidratacijos metu gali sudaryti nuo 2,06 ml iki 2,132 ml gelio. Tokiu atveju gelio ir tuštumų santykis ir gniuždymo stipris gali būti apskaičiuojamas atitinkamai pagal **1.33 ir 1.34 formules** (Amen, 2011).

$$X = \frac{0,68\alpha}{0,32\alpha + \frac{V}{C}} \quad (1.33)$$

$$f_c = aX^b \quad (1.34)$$

čia:

α – cemento hidratacijos laipsnis;

V/C – vandens ir cemento santykis;

X – gelio ir tuštumų santykis;

a – koeficientas, įvertinantis vidutinį betono gniuždymo stiprį (MPa);

b – koeficientas, įvertinantis kreivės kitimą.

Visai neseniai Jenings (2011), tyrinėdamas CSH struktūrą ir morfologiją, pastebėjo, jog egzistuoja skirtingo CSH tankio naujadarai, kurių sudedamoji dalis yra ta pati, tačiau struktūra skirtinga. Pagal pasiūlytą modelį CSH struktūra sudaryta iš elementarių dalelių, kurių dydis – apie 5,6 nm, o poringumas – 18 %. Šioje elementarioje dalelėje gali būti susiformavusių mažo tankio ir didelio tankio CSH naujadarų, kurių poringumas atitinkamai yra 24 % ir 37 %. Pagal pasiūlytą modelį galima apskaičiuoti nesureagavusio cemento ($V_{n.c.}$), susidariusio hidroksido (V_{CH}), monosulfato (V_{AFm}) ir tankios struktūros CSH ($V_{t.s.CSH}$) tūrius (**1.35–1.40 formulės**) (Jenings, 2011).

$$V_{n.c.} = c(1-a) \left(\frac{1}{\rho_{cem}} \right) \quad (1.35)$$

$$V_{CH} = c(0,189\alpha_1 p_1 + 0,058\alpha_2 p_2) \quad (1.36)$$

$$V_{AFm} = c(0,849\alpha_3 p_3 + 0,058\alpha_4 p_4) \quad (1.37)$$

$$V_{t.s.CSH} = c(0,278\alpha_1 p_1 + 0,369\alpha_2 p_2) \quad (1.38)$$

$$c = \frac{1}{1 + \frac{V}{C}} \quad (1.39)$$

$$\alpha_i = 1 - \exp(-a_i(t - b_i)^{c_i}) \quad (1.40)$$

čia:

p_i – tūrinė koncentracija (C_3S : $i = 1$; C_2S : $i = 2$; C_3A : $i = 3$ ir C_4AF : $i = 4$);

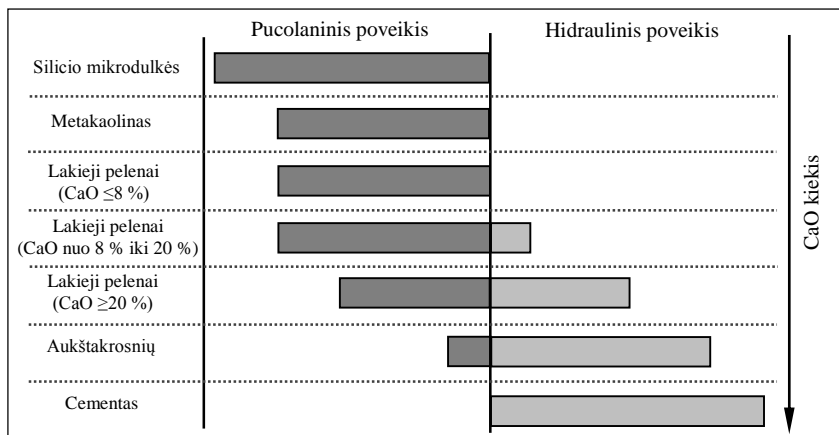
a_i, b_i, c_i – konstantos;

t – cemento hidratacijos laikas.

1.3.4. Pucolaninė reakcija

Aktyvieji mineraliniai priedai (toliau AMP) – tai gamtiniai ar dirbtiniai produktai, kurių didžiąją dalį sudaro aktyvus amorfinės struktūros silicio dioksidas (SiO_2) arba aliuminio trioksidas (Al_2O_3). Aktyvieji mineraliniai priedai, priešingai nei cementas, dažniausiai neturi tiesioginių reaktingų savybių, tačiau reaguoja su sistemoje esančiu portlanditu (CH) ir sudaro papildomus hidratacijos naujadarus (C-S-H arba C-A-H), dėl kurių dažniausiai pagerėja cemento akmens struktūra, fizikinės ir mechaninės savybės. Šie priedai dar gali būti vadinami pucolaniniais arba hidrauliniiais (Skripkiūnas, 2007). Hidratacijos metu AMP reaguojant su CH, mažėja sistemos šarmingumas (pH), taip pat tam tikras kiekis gali pristabdyti C_3A hidrataciją (Tang, 2015). Kodėl sulėtėja šio mineralo hidratacija, iki galo nėra aišku, manoma, jog tai priklauso nuo aktyviojo mineralinio priedo savitojo paviršiaus bei nuo to, kaip šis priedas sąveikauja su cemento dalelėmis. C_3S hidratacija taip pat labai priklauso nuo AMP savitojo paviršiaus. Jei AMP savitasis

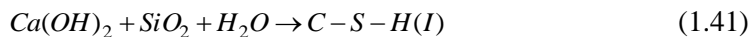
paviršius yra gana mažas, jis hidratacijos metu gali dalyvauti tarsi antrinis hidratacijos šaltinis, tuomet susidarys papildomi hidratacijos centrai, dėl kurių hidratacijos procesas suintensyvės, tad hidratacijos metu sureaguos didesnis kiekis klinkerio mineralo.



1.28 pav. Aktyviųjų mineralinių priedų pucolaninis ir hidraulinis poveikis (Velosa, 2009; Eneina, 2014)

Hidratacijos metu su cemento akmeniu įvairūs dirbtiniai AMP, tokie kaip SiO_2 mikrodulkės, metakaolinas, lakieji pelenai ar aukštakrosnių šlakas, reaguos gana skirtingai, o hidratacijos procesas priklausys nuo AMP cheminės sudėties bei aktyvumo (**1.28 paveikslas**). Pastaruoju metu didelį mokslininkų dėmesį patraukė nanodydžio SiO_2 nanodulkės, kurios turi teigiamą įtaką cemento akmens struktūrai, fizikinėms ir mechaninėms savybėms, o pats hidratacijos procesas suintensyvėja (Balandis, 2006; Jennings, 2011). Naudojant gamtinius AMP, tokius kaip smulkinta vulkaninė uoliena (angl. *volcanic rock*), kurių cheminė sudėtis labai panaši į lakiųjų pelenų (angl. *low-lime flyash*), hidratacijos procesas panašus kaip ir dirbtinių lakiųjų pelenų, o hidratacijos intensyvumas gali skirtis gana stipriai (Taylor, 1997).

Vienas iš plačiausiai naudojamų dirbtinių AMP yra SiO_2 mikrodulkės, į kurių sudėtį įeina didžioji dalis amorfinės struktūros silicio dioksido. Tai labai aktyvus hidraulinis priedas, kuris pradinuose hidratacijos etapuose gali sudaryti hidratacijos centrus, todėl paspartėja hidratacijos procesas ir sumažėja poringumas. Tirpstant klinkerio mineralui, sistemoje didėja ir pH ir kartu mišinyje didėja porų koncentracija. Esant cemento sistemoje amorfinės struktūros silicio dioksidui (SiO_2), jis gali reaguoti su susidariusiu portlanditu ir suformuoti papildomus kalcio hidrosilikatus:



Didžiausi portlantido kiekiai dažniausiai aptinkami apie panaudotus užpildus, todėl naudojant SiO_2 galima pagerinti sąlyčio zoną tarp cemento akmens bei panaudotų užpildų. Todėl, naudojant amorfinės struktūros SiO_2 , kuris sureaguoja su sąlyčio zonoje esančiu CH, galima išgauti tankesnės struktūros betoną, tačiau esant dideliems kiekiams SiO_2 labai gali nukristi sistemos pH vertė, todėl pagal LST EN 206:2014 įvairių AMP kiekiai betono mišinyje yra ribojami.

Priklausomai nuo panaudotos cemento rūšies, nuo hidratacijos laipsnio bei nuo išsiskyrusio CH kiekio, sistemoje visiškai neliktų portlandito, turėtų būti pakeista 20–25 % nuo cemento masės SiO_2 mikrodulkėmis (Edwin, 2011). Esant didesniai kiekiui SiO_2 mikrodulkių, jos pradės reaguoti su CSH (II) ir sudarys mažesnio Ca/Si santykio kalcio hidrosilikatus (CSH (I)):

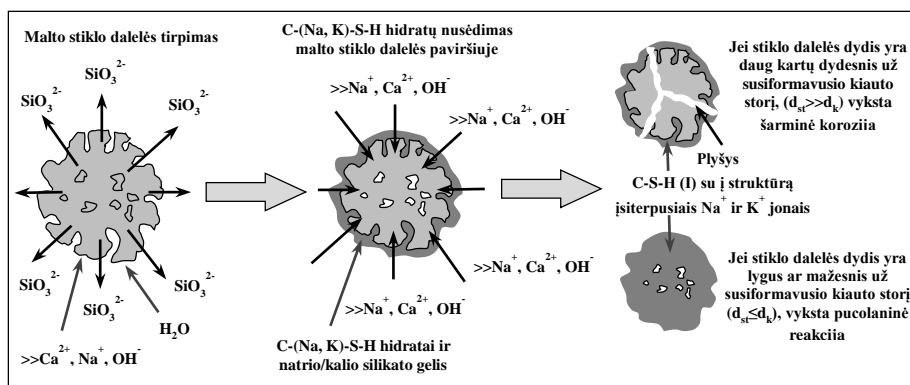


Naudojant metakoaliną, reakcijos mechanizmas yra labai panašus, kaip ir naudojant SiO_2 mikrodulkes, tačiau dėl to, jog metakaolinas išgaunamas iš kaolinito molio, kuriame yra dideli kiekiai aliuminio dioksido, tai hidratacijos metu daugiausia susidaro ne kalcio hidrosilikatų, o aliumo silikatų (CAH). Metakaolino aktyvumas yra šiek tiek prastesnis, lyginant su SiO_2 mikrodulkėmis, tačiau labai priklauso nuo dalelių savitojo paviršiaus (Taylor, 1997).

Lakiuosiuose pelenuose daugiausia yra aktyviojo SiO_2 , Al_2O_3 ir Fe_2O_3 ir didelis kiekis stiklo fazės. Lakiųjų pelenų aktyvumas daugiausia priklauso nuo stiklo fazės kiekio. Hidratacijos procese intensyviau dalyvauja tik tos lakiųjų pelenų dalelės, kurių dydis mažesnis už $10 \mu\text{m}$, stambesnės dalelės dalyvauja kaip mikroužpildas. Hidratacijos greitis labai priklauso nuo aplinkos temperatūros ir yra gerokai lėtesnis nei naudojant SiO_2 mikrodulkes (Hewlett, 2004).

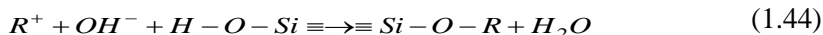
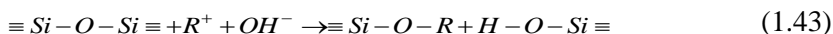
1.3.5. Šarminės korozijos tikimybė dėl malto stiklo

Šarminei korozijai vykti reikalingos šios pagrindinės sąlygos: drėgmė, pakankama Na^+ ir K^+ šarmų koncentracija, sukietėjusio betono pralaidumas skysčiams, aukšta temperatūra, taip pat turi įtakos reaktyviųjų užpildų kiekis ir dalelių dydis (Le, 2015). Siekiant tiksliau suprasti, kokiomis sąlygomis įvyksta šarminė betono korozija, tikslinga panagrinėti šarminės korozijos susidarymo mechanizmą. Anot Ichikawa (2009), šarminės korozijos mechanizmas gali būti aprašomas keliais etapais (**1.29 paveikslas**).

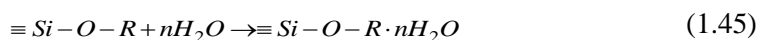


1.29 pav. Pucolaninės reakcijos ir šarminės korozijos susidarymo schema (sudaryta autoriaus)

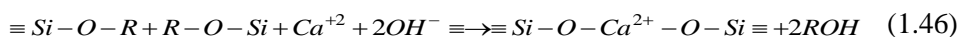
1. Natrio silikato gelio susidarymas. Šio etapo metu tirpale susidaręs šarminio metalo hidroksidas suardo erdvinę siloksano tinklo struktūrą, o reakcijos metu susidaro natrio silikatas.



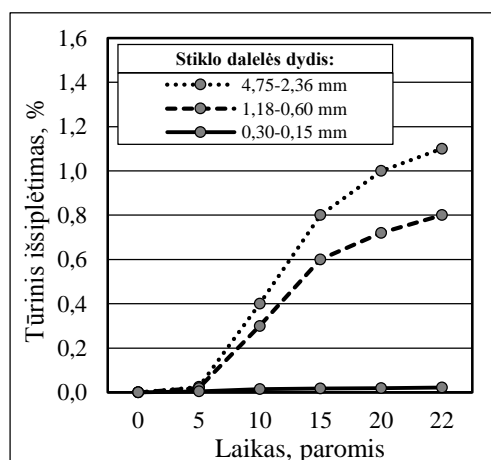
Susidaręs natrio silikatas pasižymi higroskopinėmis savybėmis (išskyrus ličio silikatą), todėl iš karto reaguoja su tirpale esančiu vandeniu ir sudaro natrio silikato gelį. Reakcija vyksta nuo reaktyviojo užpildo paviršiaus gilesnių sluoksnių link. Kuo susidaro didesnis kiekis natrio silikato, tuo tirpale lieka mažesnis kiekis hidroksido jonų, todėl tirpalo šarmingumas mažėja ir prasideda Ca^+ jonų tirpimas.



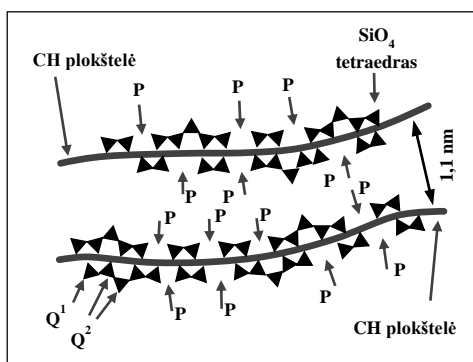
2. Natrio kalcio silikato gelio sluoksnio susiformavimas. Šio etapo metu susidaręs natrio silikato gelis reaguoja su tirpale esančiais Ca^{2+} jonais ir apie reaktyvųjų užpildą suformuoja natrio kalcio silikato gelio kiautą.



Kiautas veikia kaip pusiau laidži membrana, pro kurią tirpale esantys Ca^{2+} ir OH^- jonai gali difunduoti, tačiau naujai susiformavęs natrio silikato gelis pro susidariusią membraną negali ištekti. Tokios reakcijos metu reaktyviojo užpildo viduje susiformuoja didelis slėgis, dėl kurio užpildas suyra. Hidroksido jonų difuzijos greitis yra gerokai spartesnis nei kalcio jonų, todėl šarminės korozijos padariniai pastebimi tik po kelių mėnesių ar metų (Du, 2014). Tačiau naudojant mišinyje aktyviuosius mineralinius priedus, tokius kaip silicio mikrodulkes, lakiuosius pelenus ar aukštakrosnių šlaką, šarminės korozijos neigiami padariniai gali sumažėti. Shayan (2002), tirdamas, kokia yra malto stiklo įtaka skiedinių struktūrai, pastebėjo, jog maltas stiklas pasižymi neigiamomis išsiplėtimo deformacijomis, kai stiklo dalelių dydis $\geq 0,30$ mm; esant mažesnėms dalelėms, išsiplėtimo deformacijos labai nedidelės arba jų visai nėra (**1.30 paveikslas**). Beaudoin (2009) pasiūlė hipotezę, jog Na^+ , K^+ jonai pucolaninės reakcijos metu atskirų junginių nesudarys, tačiau bus įsiterpę į CSH nanostruktūrą (**1.31 paveikslas**).



1.30 pav. Stiklo dalelių dydžio įtaka skiedinio (V/C=0,50) išsiplėtimo deformacijoms (Shayan, 2002)



1.31 pav. CSH nanostruktūra su įsiterpusiomis priemaišomis P: Na^+ , K^+ (Beaudoin, 2009)

Visai neseniai Ichikawa (2009) pasiūlė modelį ir paaiškino, kada maltas stiklas mišinyje veiks kaip pucolaninis priedas ir kada suardys cementinę struktūrą. Pagal modelį, jei maltas stiklas bus gana smulkiai sumaltas (~50 μm), reaktyvusis užpildas bus per mažas, jog apie jį susidarytų apsauginis kiautas (pusiau laidži membrana). Todėl maltas stiklas nesudarys plėtriųjų deformacijų ir veiks kaip pucolaninis užpildas. Du (2014) savo tyrimuose pastebėjo, jog šarminės korozijos metu susidaręs natrio silikato gelis, reaguodamas su Ca^+ jonais, sudaro labai panašius hidratacijos naujadarus, kaip ir susidaro pucolaninės reakcijos metu, todėl stiklas gali veikti kaip pucolaninis priedas. Tačiau siekiant šias hipotezes patvirtinti ar patikslinti, būtini išsamesni tyrimai.

1.3.6. Pagrindinės YSB ilgalaikiškumo savybės

Ilgalaikiškumas – tai betono savybė tam tikroje aplinkoje išlaikyti savo pradines projektines savybes, nekintant pastovumui ir geometriniam vientisumui. Betono irimas (korozija) gali prasidėti nuo įvairių fizikinių veiksnių (dilimo, užšalimo ir atšilimo, ugnies, druskų kristalizacijos), cheminių veiksnių (šarminės korozijos, chloridų įsiskverbimo į gilesnius sluoksnius, nuo kurių prasidėtų armatūros korozija, sulfatų poveikio, uždelsto etringito susiformavimo) ar šių veiksnių derinių. Kadangi YSB struktūra skiriasi nuo įprastinės sudėties betono, tikslinga tam tikras YSB ilgalaikiškumo savybes panagrinėti detaliau.

Atsparumas tūriniam šaldymo ir atšildymo poveikiui. Daugelis autorių, taikydami tūrinį šaldymo ir atšildymo metodą, dažniausiai matuoja, kaip bandiniuose keičiasi santykinis dinaminis tamprumo modulis. Santykinis dinaminis tamprumo modulis – tai dinaminio tamprumo modulio vertė, gautos po tam tikro šaldymų ir atšildymų ciklą, skaičiaus santykis su pradine dar šalčio poveikio nepaveikto bandinio dinaminio tamprumo modulio verte. Bonneau (1997) nustatė, jog po 300 šaldymo ir atšildymo ciklų vandenyje 200 MPa gniuždymo stiprio betono santykinio dinaminio modulio vertė $\geq 100\%$. Panašius tyrimo rezultatus gavo ir Graybeal (2006). Padidėjusią dinaminio tamprumo modulio vertę autoriai aiškina tuo, jog šaldymo ir atšildymo metu sureagavo didesnis kiekis cemento, dėl to struktūra sutankėjo ir dėl ardomojo šalčio poveikio nebuvo pažeista. Normalaus stiprumo betono (stipris gniuždant 30–50 MPa) bandinių po 300 ciklų paviršius dažniausiai supleišėja, atsiranda masės nuostolių, sumažėja dinaminis tamprumo modulis (Graybeal (2007)). Gao (2006), tyrinėdamas 200 MPa gniuždymo stiprio betoną, pastebėjo, jog net ir po 800 tūrinio šaldymo ir atšildymo ciklų vandenyje santykinis dinaminio tamprumo modulis taip pat nesumažėjo. Vernet (2004), tyrinėdamas 200 MPa gniuždymo stiprio betoną ir atlikęs 500 tūrinio šaldymo ir atšildymo ciklų jūros vandenyje, taip pat nepastebėjo jokių destruktijos pokyčių ar gniuždymo stiprio sumažėjimo. Lee (2005), tyrinėdamas skirtingo stiprio betonų atsparumą šalčio poveikiui, gavo, jog po 1000 tūrinio šaldymo ir atšildymo vandenyje ciklų ypač stipraus betono (stipris gniuždant 200 MPa) santykinio dinaminio tamprumo modulio vertė siekė 90 %, ypač stipraus betono (stipris gniuždant 150 MPa) ir normalaus stiprumo betono (stipris gniuždant 30–50 MPa) atitinkamai santykinio dinaminio tamprumo modulio vertės yra 78 % ir 39 %.

Acker (2004) pastebėjo, kad YSB struktūroje atsiradę mikroįtrūkiai dėl šalčio poveikio, gali „užsigydyti“, jei bandiniai bus palikti ilgesnį laiką (3–6 mėn.) kietėti 20 °C temperatūros vandenyje. Jacobsen (2006) atkreipė dėmesį, jog jei ypač stiprus betonas, kurio gniuždymo stipris svyruoja nuo 100 iki 150 MPa, santykinis dinaminio tamprumo

modulis dėl ardomo šalčio poveikio sumažės iki 50%, o po trijų mėnesių kietėjimo vandenyje bandiniai gali atgauti praktiškai visą savo pradinę dinaminio tamprumo modulio vertę. Tačiau tų bandinių gniuždymo stipris padidėja tik iki 5 %.

Atsparumas paviršiniam šaldymo ir atšildymo poveikiui. Paviršinio šaldymo ir atšildymo metodo metu dažniausiai matuojamas nutrupėjusios medžiagos nuo šaldomo paviršiaus kiekis. Bonneau (1997), tirdamas ypač stipraus betono (200 MPa) atsparumą šalčio poveikiui, pastebėjo, jog po 28–50 paviršinio šaldymo ciklų masės nuostoliai atitinkamai kinta nuo 8 g/m² iki 60 g/m². Schmidt (2003), tirdamas skirtingo stiprumo betonų, pastebėjo, jog po 28 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų, kai betono gniuždymo stipris svyruoja nuo 100 MPa iki 150 MPa, paviršiaus masės nuostoliai ≤150 g/m², o normalaus stiprumo betono, kai gniuždymo stipris kinta nuo 30 MPa iki 50 MPa, atitinkamai masės nuostoliai kinta nuo 1000 g/m² iki 1500 g/m².

Chloro jonų difuzijos koeficientas. Difuzija betonuose, kaip ir daugelyje kitų porėtų medžiagų, yra vienintelis skysčių ar dujų apykaitos procesas. Šio proceso metu, esant tam tikram koncentracijų skirtumui, chaotiškai judėdamos molekulės iš vienos erdvės į kitą perneša masę, energiją ir judesio kiekį. Daugiausia neigiamos įtakos betono struktūrai turi įvairios žalingos priemonės, kurios kapiliarais patenka į gilesnius struktūros sluoksnius. Todėl vienas iš būdų, kuriuo galima įvertinti betono ilgaamžiškumą, tai nustatyti medžiagos difuzijos koeficientą. Difuzijos koeficientas, kuris skaitine verte lygus medžiagos masei, pernešamai per izokoncentracinio paviršiaus ploto vienetą per sekundę, kai koncentracijos gradiento modulis lygus vienetui. Roux (1996), tyrinėdamas skirtingo stiprio betonų, nustatė, jog 200 MPa, 150 MPa ir 30 MPa gniuždymo stiprio betonų difuzijos koeficiento vertės atitinkamai yra $2,0 \cdot 10^{-14}$ m²/s, $6,0 \cdot 10^{-13}$ m²/s ir $1,1 \cdot 10^{-12}$ m²/s.

Chloro jonų įsiskverbimo gylis. Dar vienas svarbus parametras, turintis įtakos ypač stipraus betono ilgaamžiškumui, tai chloro jonų įsiskverbimo gylis. Gao (2006), atlikęs 128 valandų trukmės bandymą, kuriame keitė į bandinį nukreiptą hidraulinį slėgį nuo 0,1 MPa iki 1,6 MPa, gavo, jog 220 MPa gniuždymo stiprio betono vidutinis chlorido jonų įsiskverbimo gylis yra apie 2,7 mm. Schmidt (2003), taikydamas pagreitintą chlorido jonų įsiskverbimo gylio nustatymo metodą, kuriame per bandinį 6 valandas leido 40 V nuolatinę srovę, gavo, jog YSB, kurio gniuždymo stipris 200 MPa, chloro jonų įsiskverbimo gylis yra apie 1 mm. Palyginimui: Schmidt (2003) pateikia, jog ypač stipraus betono, kurio gniuždymo stipris svyruoja nuo 100 iki 150 MPa, ir normalaus stiprio betono, kurio gniuždymo stipris 30 MPa, chloro jonų įsiskverbimo gylis atitinkamai yra 8 mm ir 23 mm.

Deguoies ir azoto pralaidumo koeficientas. Pagal Vernet (2004) tyrimo rezultatus, ypač stipraus betono (200 MPa) deguoies laidumo koeficientas ≤ $1,0 \cdot 10^{-20}$ m². Palyginimui: Vernet (2004) pateikė, jog 150 MPa betono ir 30 MPa betono deguoies laidumo koeficientas atitinkamai yra $1,0 \cdot 10^{-19}$ m² ir $1,0 \cdot 10^{-18}$ m². Herold (2004) nustatė, jog 200 MPa stiprio betono azoto pralaidumo koeficientas yra $1,0 \cdot 10^{-19}$ m², o 150 MPa ir 30 MPa atitinkamai yra $4,0 \cdot 10^{-17}$ m² ir $6,7 \cdot 10^{-17}$ m².

YSB irimas dėl armatūros elektrocheminės korozijos. Patekus tam tikram kiekiui chloridų iki armatūros ar plieninių pluoštų, vykstant elektrocheminei korozijai plienas gali padidinti rūdžių turį iki 600 %. Roux (1996), tyrinėdamas įvairaus stiprumo betonų atsparumą šalčio poveikiui, nustatė, jog 200 MPa betone esančios armatūros korozijos greitis yra ≤0,01 μm/metai. Taip pat pabrėžė: jei armatūros korozijos greitis yra ≤1,0 μm/metai, tai tokiaime betone elektrocheminė armatūros korozijos žalingas poveikis

per mažas ir nėra pavojingas. Palyginimui: Roux (1996) taip pat pateikė ypač stipraus betono 150 MPa gniuždymo stiprio ir įprastinio betono (30 MPa) elektrocheminės korozijos greičius, kurie atitinkamai yra $\sim 0,25 \mu\text{m}/\text{metai}$ ir $\sim 1,2 \mu\text{m}/\text{metai}$. Vertindamas konduktometriniu metodu nustatė, jog 200 MPa betono savitoji varža, kai be pluošto – $1130 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, kai su pluoštu (2 % pagal tūrį) – $137 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, o 150 MPa ir 30 MPa betonų atitinkamai $96 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ ir $16 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$. Jei betono savitoji varža $\geq 20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, tai tokiaame betone armatūros elektrocheminė korozijos tikimybė negalima.

Karbonizacijos gylis. Betonui sąveikaujant su anglies dioksidu (CO_2), po tam tikro laiko paviršius gali karbonizuotis. Schmidt (2003), taikydamas pagreitintą karbonizacijos nustatymo metodą, gavo, jog YSB, kurio gniuždymo stipris 200 MPa, karbonizacijos gylis po 6 mėnesių yra $\leq 0,5 \text{ mm}$. Palyginimui taip pat pateikė, jog YSB betono, kurio gniuždymo stipris kinta nuo 100 MPa iki 150 MPa, ir normalaus stiprumo betono, kurio gniuždymo stipris 30 MPa, karbonizacijos gylis atitinkamai yra 1,5–4,0 mm ir 7 mm.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Nėra iki galo aišku, kaip neracionaliai didelis priedų kiekis ir mažas vandens ir cemento santykis paveiks cemento hidratacijos procesą, kinetiką ir hidratacijos metu susidariusių naujų struktūrų bei morfologiją.
2. Remiantis literatūros analize buvo nustatyta, jog YSB sudėtyje lieka daugiau nei 50 % nesureagavusio rišiklio. Rišiklio kiekis galėtų būti sumažintas optimizuojant betono mišinio granulimetrinę sudėtį matematiniais skaičiavimais.
3. Nėra vieningos nuomonės ir ilgalaikių tyrimų dėl malto stiklo poveikio cemento hidratacijos procesui bei hidratacijos metu susidariusių naujų struktūrų stabilumui, taip pat nėra aišku, kokia šių naujų struktūrų įtaka cemento akmens struktūrai, mechaninėms savybėms ir ilgalaikiškumui.
4. Dėl mažo V/C santykio ir didelio kiekio rišiklio šie betonai gali būti labai jautrūs maišymo parametrų, todėl gali tapti sunkesnis cemento hidratacijos procesas ir nepavykti išgauti norimos struktūros betono. Šios problemos gali dar labiau pasireikšti gamybinėmis sąlygomis, todėl būtini tikslesni eksperimentiniai tyrimai ir rekomendacijų sukūrimas.

Remiantis literatūros analizės rezultatais ir pateiktomis išvadomis, formuluojami šie disertacinio darbo uždaviniai:

- 1.1. Ištirti silicio mikrodulkių ir malto stiklo įtaką cemento akmens struktūrai ir savybėms.
- 1.2. Pritaikyti Brouwers ir Amen matematinius modelius struktūros ir stiprumo savybėms prognozuoti bei sukurti ypač stipraus betono mišinio sudėties projektavimo metodiką.
- 1.3. Ištirti malto stiklo įtaką portlandcemenčio hidratacijos procesui.
- 1.4. Tyrimo rezultatus patikrinti gamybos sąlygomis ir parengti rekomendacijas ypač stipraus betono gamybai.

2. NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODIKA

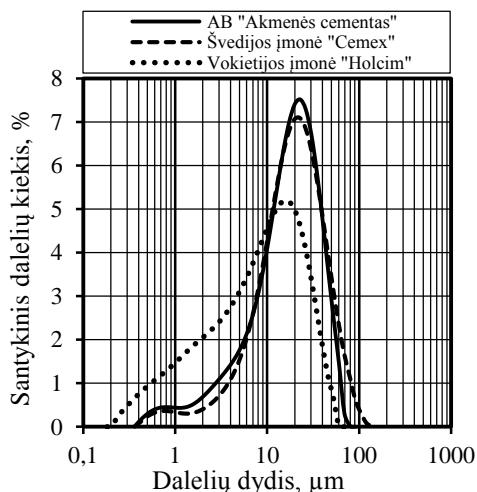
2.1. Naudotos medžiagos

2.1.1. Portlandcementis

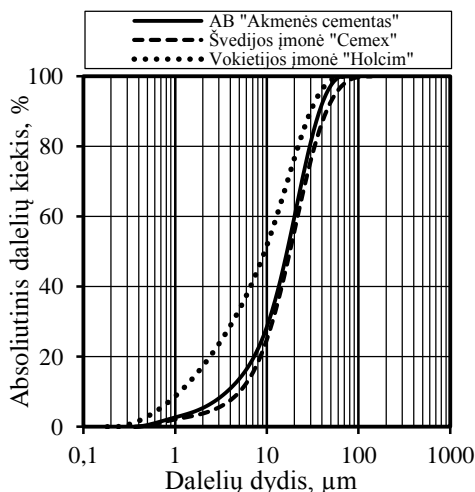
Eksperimentinių tyrimų metu naudotas trijų gamintojų portlandcementis, kurio pagrindinės savybės pateiktos **2.1 ir 2.2 lentelėse** bei **2.1 ir 2.2 paveiksluose**.

2.1 lentelė. Portlandcemenčio, silicio mikrodulkų ir malto stiklo fizikinės ir mechaninės savybės

Žaliava	Portlandcementis CEM I 52,5 R			Silicio mikrodulkės		Malto stiklas
Gamintojas	AB „Akmenės cementas“	Švedijos įmonė CEMEX	Vokietijos įmonė „Holcim“	UAB BASF	UAB „Elkem“	–
Tūrio pastovumas, mm	≤1	≤1	≤1	–	–	–
Normalaus tirštumo tešla, %	29,3	31	28,5	–	–	–
Rišimosi (pradžią/pabaigą) min.	130/215	100/205	110/210	–	–	–
Lenkimo stipris, MPa (po 2/28 p.)	6,0/8,1	–	5,7/8,1	–	–	–
Gniuždymo stipris, MPa (po 2/28 p.)	38,6/65,3	45,0/62,0	32,3/63,1	–	–	–
Savitasis tankis, kg/m ³	3100	3150	3050	2120	2531	2528
Piltinis tankis, kg/m ²	–	–	–	255	400	–
Savitasis paviršius, m ² /kg	435,0	520,0	484,0	1920,0	2059,0	334,8



2.1 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoto portlandcemenčio diferencialinis pasiskirstymas pagal skersmenis



2.2 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoto portlandcemenčio integralinis pasiskirstymas pagal skersmenis

2.1.2. Betono mineraliniai mikroužpildai

SiO₂ mikrodulkės. Tyrimams naudotos BASF ir „Elkem“ įmonių SiO₂ mikrodulkės. Tai ferosilicio lydinių metu susidarančios labai smulkios dulkės (su dideliu kiekiu amorfinio SiO₂). Pagrindinės savybės pateiktos **2.1 ir 2.2 lentelėse** bei **2.3 ir 2.4 paveiksluose**. Papildomos BASF įmonės SiO₂ mikrodulkių savybės: piltinis tankis (laisvai supiltų/sutankintų) – 255/329 kg/m³, higroskopiškumas 158 %, natūralaus byrėjimo kampas 54°.

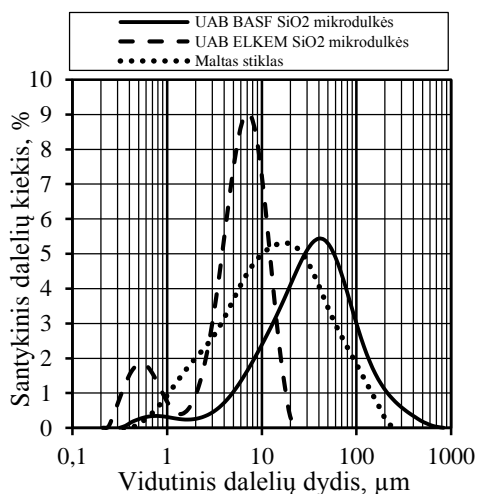
2.2 lentelė. Portlandcemenčio, silicio mikrodulkių ir malto stiklo cheminė ir mineralinė sudėtis

Žaliava	Portlandcementis			Silicio mikrodulkės		Maltas stiklas
Gamintojas	AB „Akmenės cementas“	Švedijos įmonė CEMEX	Vokietijos įmonė „Holcim“	UAB BASF	UAB „Elkem“	–
Cheminė sudėtis:						
SiO ₂	20,61	21,00	21,10	92,08	97,60	72,76
TiO ₂	–	–	0,22	–	–	0,04
Al ₂ O ₃	5,45	3,90	3,42	1,20	0,80	1,70
Fe ₂ O ₃	3,36	2,90	5,23	1,24	0,05	0,79
MnO	–	–	0,05	–	–	0,02
MgO	3,84	2,70	0,79	0,80	0,13	2,09
CaO	63,42	64,50	66,40	–	0,37	9,74
SO ₃	0,80	3,40	1,93	1,27	0,08	0,10
Na ₂ O	–	–	0,19	1,13	–	12,56
K ₂ O	–	–	0,38	0,67	0,19	0,76
P ₂ O ₅	–	–	0,28	–	–	0,02
Mineralinė sudėtis:						
C ₃ S	60,10	72,60	79,40	–	–	–
C ₂ S	13,80	5,50	0,60	–	–	–
C ₃ A	8,80	5,40	0,20	–	–	–
C ₄ AF	10,20	8,80	15,90	–	–	–

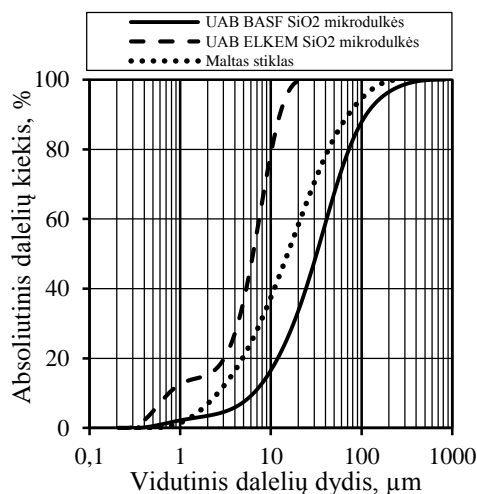
Maltas stiklas. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotas iš įvairios stiklo taros sutrupintas stiklas. Pagrindinės savybės pateiktos **2.1 ir 2.2 lentelėse** bei **2.3 ir 2.4 paveiksluose**.

2.3 lentelė. Malto kvarcinio smėlio, malto granito ir smėlio fizikinės bei mechaninės savybės

Žaliava	Maltas kvarcinis smėlis		Maltas granitas	Kvarcinis smėlis		Smėlis
Gamintojas	AB „Anykščių kvarcas“	UAB „Quarzwerke Gruppe“	UAB „Granitas“	AB „Anykščių kvarcas“	UAB „Quarzwerke Gruppe“	UAB „Zatyšių karjeras“
Savitasis tankis, kg/m ³	2670	2671	2670	2670	2671	2670
Piltinis tankis, kg/m ²	1425	900	1600	1600	–	1625
Savitasis paviršius, m ² /kg	504,0	335,0	450,0	–	9,1	–



2.3 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų mineralinių mikroužpildų diferencialinis pasiskirstymas pagal skersmenis



2.4 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų mineralinių mikroužpildų integralinis pasiskirstymas pagal skersmenis

2.1.3. Betono inertiniai mikroužpildai

Maltas kvarcinis smėlis. Tyrimuose naudotas AB „Anykščių kvarcas“ ir UAB „Quarzwerke Gruppe“ įmonių maltas kvarcinis smėlis, kurių pagrindinės savybės pateiktos 2.4–2.7 lentelėse bei 6.5 ir 6.6 paveiksluose.

Maltas granitas. Tyrimams naudotas UAB „Granitas“ granitas. Granitas buvo sumaltas rutuliniu malūnu, pagrindinės savybės pateiktos 2.4 lentelėje bei 2.5 ir 2.6 paveiksluose.

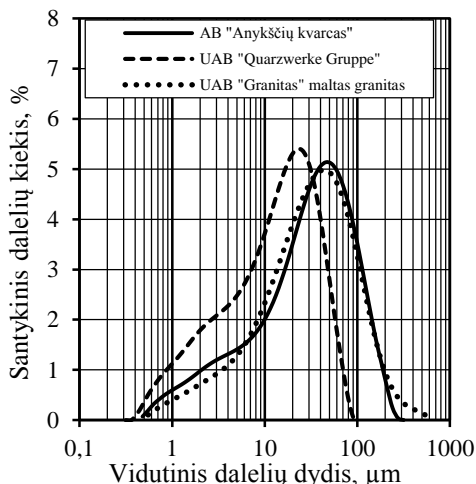
2.4 lentelė. Malto kvarcinio smėlio, malto granito ir smėlio cheminė sudėtis

Žaliava	Maltas kvarcinis smėlis		Maltas granitas	Kvarcinis smėlis		Smėlis
Gamintojas	AB „Anykščių kvarcas“	UAB „Quarzwerke Gruppe“	UAB „Granitas“	AB „Anykščių kvarcas“	UAB „Quarzwerke Gruppe“	UAB „Zatyšių karjeras“
Cheminė sudėtis:						
SiO ₂	99,20	98,70	72,04	99,20	98,70	82,39
TiO ₂	0,10	0,04	0,30	0,10	0,04	0,21
Al ₂ O ₃	0,60	0,50	14,42	0,60	0,50	3,89
Fe ₂ O ₃	0,05	0,05	1,22	0,05	0,05	1,32
MgO	–	0,06	0,71	–	0,06	0,54
CaO	–	0,15	1,82	–	0,15	3,74
SO ₃	–	0,03	–	–	0,03	0,15

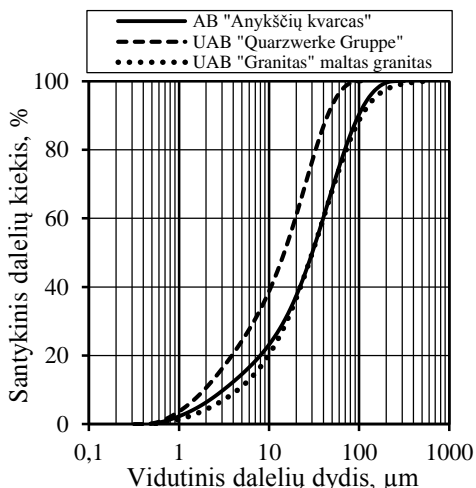
2.1.4. Betono užpildai

Kvarcinis smėlis. Tyrimuose naudotas AB „Anykščių kvarcas“ ir UAB „Quarzwerke Gruppe“ įmonių kvarcinis smėlis, kurių granulimetrinės sudėtys pateiktos 2.5–

2.7 lentelėse. Pagrindinės UAB „Quarzwerke Gruppe“ įmonės 0/0,5 mm frakcijos kvarcinio smėlio savybės: savitasis tankis – 2650 kg/m³; vidutinis dalelės dydis – 0,26 mm; savitasis paviršius (pagal Bleiną) – 91 cm²/g. Pagrindinės AB „Anykščių kvarcas“ įmonės kvarcinio smėlio savybės: frakcija – 0/1 ir 0/1,6 mm; savitasis tankis – 2670 kg/m³; piltinis tankis – 1600 kg/m³, molio ir dulkių kiekis – 0,5 %; kietumas pagal Moso skalę – 7.



2.5 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų inertinių mikroužpildų diferencialinis pasiskirstymas pagal skersmenis



2.6 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų inertinių mikroužpildų integralinis pasiskirstymas pagal skersmenis

Smėlis. Tyrimams naudotas vidutinio stambumo UAB „Zatyšių karjeras“ įmonės smėlis, pagrindinės savybės: frakcija 0/2 mm, vidutinis tankis – 2670 kg/m³, piltinis tankis – 1625 kg/m³, tuštymėtumas – 39,1 %, molio ir dulkių kiekis – 1,5 %.

2.5 lentelė. UAB „Quarzwerke Gruppe“ įmonės 0/0,5 mm frakcijos kvarcinio smėlio granulimetrinė sudėtis

Dalelės dydis (mm)	>0,500	0,355–0,500	0,250–0,355	0,180–0,250	0,125–0,180	0,090–0,125	<0,09
Kiekis, %	0	8	48	33	10	1	0

2.6 lentelė. AB „Anykščių kvarcas“ įmonės 0/1 mm frakcijos kvarcinio smėlio granulimetrinė sudėtis

Dalelės dydis (μm)	1000	800	630	400	315	200	160	100	63	50	0
Kiekis, %	0	0,02	0,68	5,9	9,8	40,3	18,4	17,1	7,2	0,58	0,02

2.7 lentelė. AB „Anykščių kvarcas“ įmonės 0/1,6 mm frakcijos kvarcinio smėlio granulimetrinė sudėtis

Dalelės dydis (μm)	1600	1250	1000	800	630	400	315	0
Kiekis, %	0,00	1,06	5,70	63,65	26,41	2,53	0,24	0,41

2.1.5. Dispersinis betono armavimas

Plieninis armuojantis pluoštas. Tyrimuose naudotas plieninis pluoštas, skirtas betonui mikroarmuoti. Pagrindinės savybės: ilgis – 13 mm, skersmuo – 0,30 mm, tempimo stipris – 1000 MPa.

2.1.6. Cheminiai priedai

Superplastiklis. Tyrimuose naudotas UAB BASF ir UAB „Sika AG“ įmonių superplastikliai, kurių veiklioji medžiaga – polikarboksilato eteriai. Pagrindinės savybės pateiktos **2.8 lentelėje**.

2.8 lentelė. Tyrimams naudotų superplastiklių fizikinės ir cheminės savybės

Žymėjimo paaiškinimas	Gamintojas	Tankis, g/cm ³	Vandenilio jonų koncentracija, pH	Chloridų kiekis, %	Šarmų kiekis (pagal masę), %
Glenium SKY 623	UAB BASF	1,06±0,02	5,5±1,5	≤0,10	≤0,6
Glenium 50	UAB BASF	1,95±0,02	7,0±1,0	≤0,10	≤4,0
Sika Viscocrete D190	UAB „Sika AG“	1,04	4,4	≤0,10	≤0,6

2.1.7. Pagalbinės priemonės

Tyrimams panaudoti PFINDER 902 fluorescenciniai dažai ir PFINDER 970 fluorescencinių dažų ryškalas, kurie skirti aptikti medžiagos paviršiuje atsiradusiems mikrotrūkiams. Pagrindinės savybės pateiktos **2.9 lentelėje**.

2.9 lentelė. Tyrimams naudotų pagalbinių priemonių fizikinės savybės

Žymuo	Gamintojas	Spalva	Tankis, kg/m ³	Dinaminė klampa (20 °C), mm ² /s
PFINDER 902	UAB BAUGH & WEEDON	geltonai žalia	962	9,6
PFINDER 970	UAB BAUGH & WEEDON	bespalvė	850	10,0

2.2. Tyrimų metodika

Malto stiklo paruošimas. Tyrimuose naudotas iš įvairios stiklo taros sumaltas stiklas. Prieš trupinimą nuo stiklo taros buvo pašalinamos prilipusios etiketės, lipdukai ir kiti nešvarumai. Maltas stiklas paruoštas trimis etapais: stiklo žaliava plaktuku smulkinama iki 1–5 cm dydžio duženų, kurios vėliau buvo trupinamos žiauniniu trupintuvu iki 0/5 mm frakcijos užpildo, o 0/5 mm frakcijos užpildas buvo malamas laboratoriniu malūnu. Dalis malto stiklo buvo paruošta diskiniame vibraciniame malūne, dalis – rutuliniame malūne.

Pagrindiniai diskinio vibracinio malūno parametrai: išorinio cilindro skersmuo – 2171,00 mm, sienelės storis – 5,84 mm; aukštis – 58,00 mm; masė – 6,246 kg. Medžiaga buvo trinama tarp trijų mažesnių tuščiavidurių cilindų: 1) žiedo skersmuo – 184,60 mm; sienelės storis – 14,50 mm; aukštis – 47,55 mm; masė – 2,827 kg; 2) žiedo skersmuo – 134,05 mm; sienelės storis – 14,50 mm; aukštis – 14,50 mm; masė – 1,878 kg; 3) cilindro

skersmuo – 83,90 mm; aukštis – 47,05 mm; masė – 1,951 kg. Sukimosi greitis – 750–940 sūkių per minutę. Malama buvo 36 s 100 g medžiagos.

Pagrindiniai rutulinio malūno parametrai: būgno skersmuo – 70 cm, būgno ilgis – 52 cm, rutulio skersmuo – 6,35 cm, rutulio masė – 1,030 kg, rutulių skaičius malimo metu – 120 vnt. Kiekvieno malimo metu buvo malama 3 kg medžiagos.

Smulkumo nustatymas ir dalelių pasiskirstymas pagal dydį. Naudotų medžiagų savitasis paviršius buvo nustatytas oro pralaidumo metodu Bleino prietaisu pagal LST EN 196-6:2010. Užpildo dalelių pasiskirstymas nustatytas lazeriniu granulimetru „Mastersizer 2000“. Kaip dispersinė fazė naudotas izopropanolis, o kietosios medžiagos kiekis suspensijoje 13–15 %. Dalelių dispergavimo ultragarsu trukmė – 100 s, matavimo trukmė – 15 s.

Betono mišinio paruošimas. Betono mišiniam paruošti buvo naudoti sausieji užpildai. Cementas, aktyvieji mineraliniai mikroužpildai, užpildai, vanduo ir cheminiai priedai buvo dozuojami pagal masę. Dalis cheminių priedų buvo ištirpinami vandenyje ir įmaišomi į mišinį kartu su vandeniu, dalis be vandens. Dalis sudėčių buvo sumaišyti su laboratorine vibracine maišykle, dalis – su vibracine greitaveike maišykle, dalis – su vakuumine maišykle. Pagrindiniai vibracinės maišyklės parametrai: svyravimo dažnis 30–500 Hz, tūris – 4 litrai. Maišymas pradedamas nuo mažiausio dažnio ir per 15 sekundžių pakeliamas iki maksimalaus. Pagrindiniai vakuuminės maišyklės parametrai: modelis – „Eirich R02“; tūris – 10 litrų; betono mišinio temperatūros matavimas – iki 180 °C; būgno variklio galingumas – 0,88 kW, mentės variklio galingumas – 4,00 kW.

2.10 lentelė. Betono mišinio maišymo seka, naudojant vibracinę ir vibracinę greitaveikę maišykles

Laikas, s	Maišymo seka
60	Sausųjų komponentų homogenizavimas
30	Supilamas visas vanduo ir 50 % superplastiklio
60	Mišinio homogenizavimas
240	Pauzė
30	Supilama 50 % likusio superplastiklio
60	Homogenizavimas

Betoninių bandinių formavimas ir kietinimas. Sukietėjusio betono savybėms tirti buvo suformuoti cilindro ($d = 50$ mm, $h = 50$ mm), kubo ($40 \times 40 \times 40$ mm; $100 \times 100 \times 100$ mm) ir prizmelės ($10 \times 40 \times 160$; $40 \times 40 \times 160$; $70 \times 70 \times 210$ mm) formos bandiniai. Supiltas į formas mišinys buvo tankinamas 2 minutes ant laboratorinio vibracinio stalo „ToniVIB“. Sutankintas mišinys buvo laikomas 24 h klimatinėje kameroje 20 °C temperatūroje, esant 95 % santykinei oro drėgmei. Po 24 parų dalis bandinių buvo laikomi vandenyje, dalis kietinti šutinimo kameroje 80 °C (šutinimo režimas 1+18+3 h). Po šutinimo likusį laiką iki bandymo bandiniai buvo laikomi vandenyje (20 ± 2 °C).

Bandinių paruošimas instrumentinei analizei ir cemento hidratacijos stabdymas. Siekiant tiksliau identifikuoti hidratacijos metu susidariusius junginius, buvo suformuoti cemento tešlos bandiniai su skirtingu aktyviųjų mineralinių priedų kiekiu, nenaudojant inertinių užpildų. Maišymas truko iki 10 min ir buvo atlikta rankomis. Aktyvieji dispersiniai priedai pradžioje buvo sumaišomi su cementu, paskui rišiklio mišinys buvo maišomas su vandeniu ir cheminiais priedais. Sukietėjęs cemento akmuo buvo laikomas tokiomis pat sąlygomis kaip ir betoniniai bandiniai. Praėjus numatytam kietėjimo laikui, cemento akmuo buvo sutrinamas į miltelius, o milteliai užpilami ir

laikomi izopropanolio tirpale tol, kol bus atliekama instrumentinė analizė. Prieš atliekant bandymą milteliai buvo džiovinami apie valandą 40 °C temperatūroje.

2.11 lentelė. Betono mišinio maišymo seka, naudojant vakuuminę greitaveikę maišyklę

Laikas, s	Sukimosi greitis, m/s		Maišymo procedūra
	Būgno	Mentės	
60	0,5	3,6	Sausųjų komponentų homogenizavimas
30	0,5	3,6	Supilamas visas vanduo ir 50 % superplastiklio
60	0,5	7,3	Mišinio homogenizavimas
240	0	0	Pauzė
30	0,5	3,6	Supilama 50 % likusio superplastiklio
60	0,5	3,6	Mišinio homogenizavimas sudarant vakuumą (0,1 bar)
–	0	0	Vakuomo pašalinimas

Betono bandinių porų pagal dydį pasiskirstymas ir poringumo parametrų nustatymas. Sukietėjusio betono porų pagal dydį pasiskirstymas nustatytas gyvsidabrio porometrijos metodu. Gyvsidabrio porometrijos bandymo metu buvo naudojamas „Micromeritics Instrument Corporation“ įmonės porometras AUTOPORE III, kurio pagrindinės savybės: maksimalus bandinio skersmuo iki 2,5 cm; skiriamoji geba – nuo 360 μm iki 0,003 μm, tikslumas – ±1%. Po 28 parų kietėjimo sugniuždytų betono cilindrų ($d = 50$ mm, $h = 50$ mm) atskilę fragmentai buvo įdedami į sandarų indą, užpilami izopropanolio tirpalu ir laikomi iki bandymo. Prieš atliekant bandymą atskilę sugniuždyto betono fragmentai buvo apie valandą džiovinami 40 °C temperatūroje. Skaičiuojant buvo laikomasi šių prielaidų: gyvsidabrio paviršiaus įtempimas – 480 mN/m; gyvsidabrio ir analizuojamosios medžiagos drėkinimo kampas – 140°, bandymo metu slėgis kito iki 450 MPa.

Rentgeno spinduliuotės difrakcinė analizė. Kokybinė rentgenografinė analizė buvo atlikta naudojant „GE Sensing & Inspection Technologies GmbH“ įmonės difraktometrą XRD 3003 TT, kurio pagrindinės savybės: spinduliuotė – CuK_α ($\lambda = 1,54$ Å), filtras – Ni, detektoriaus judėjimo žingsnis – 0,02°, matavimo trukmė žingsnyje – 6 s, matavimo tikslumas – ±0,01 %. Bandymo metu matavimo kampas (2θ) svyravo nuo 5° iki 70°. Kiekybinė analizė buvo atlikta taikant Rietveldo aprobavimą, tiriamoji medžiaga buvo sumaišyta su 20 % (pagal masę) ZnO. ZnO – tai standartinė medžiaga, naudojama kiekybinei analizei atlikti. ZnO tam, kad nereaguotų su aplinka, buvo laikomas argono aplinkoje. Taikant Rietveldo aprobavimą, tirtuose cemento akmenų bandiniuose buvo nustatyti kristalinės ir nekristalinės fazės junginiai.

Vienalaikė terminė analizė. Vienalaikė terminė analizė atlikta „Netzsch STA 409 PC Luxx“ terminiu analizatoriumi. Bandymo metu buvo taikyta tokia procedūra: temperatūros didinimo greitis – 10 °C/min, temperatūros intervalas – 25–1000 °C, etalonas – tuščias Pt/Rh tiglis, atmosfera krosnyje – oras.

²⁹Si magnetinis branduolių rezonansas. Branduolių magnetinis rezonansas atliktas naudojant „Bruker Avance 300“ spektrometrą, esant magnetiniam lauko stiprumui 7,0455 T, ²⁹Si branduolio rezonansinis dažnis – 59,63 Mhz. Siekiant išmatuoti ²⁹Si spektrą, analizuojama medžiaga buvo padedama ant 7 mm cirkonio rotorius ir sukama 54°44 kampu, suteikiant 5 kHz dažnį. Cheminiai poslinkiai (rezonansinių dažnių pasislinkimas) buvo apskaičiuojami lyginant su standartinės medžiagos tetrametilsilanu (CH₃)₄Si cheminiu poslinkiu. Mėginys buvo matuojamas 2000 kartų, suteikiant vientisą

impulsą, kurio trukmė – 6 μ s. Dėl lėto silicio mikrodulkių ir malto stiklo relaksacijos laiko bandiniams su šiais aktyviaisiais mineraliniais priedais impulso atsikartojimo laikas buvo parinktas 45 s. Spektrui šifruoti buvo taikoma „Bruker WINNMR“ programinė įranga. Magnetinė ^{29}Si branduolio rezonanso spektro analizė atlikta taikant standartinį Q^n šifravimą.

Tūrinis ir paviršinis šaldymo ir atšildymo metodas. Tūrinis ir paviršinis šaldymo ir atšildymo bandymas atliktas atitinkamai pagal LST EN 1338:2003/AC:2006 ir LST L 1428.17:2005. Eksperimento metu buvo naudojamas 3 % NaCl tirpalas, cilindro ($d = 50$ mm, $h = 50$ mm) ir prizmės ($70 \times 70 \times 210$ mm) formos bandiniai.

Fluorescencinis mikroskopijos metodas. Betono paviršiuje atsiradusiems įtrūkiams identifikuoti panaudotas optinis fluorescencinis mikroskopijos metodas. Šiuo metodu identifikuoti cikliškai šaldomų ir atšildomų bandinių paviršiuose atsiradę defektai (0,1–500 μ m). Bandymo metu bandinio paviršius nuplautas tekančio vandens srove, paviršius išdžiovintas laboratorinėje aplinkoje (temperatūra 20 ± 2 °C, santykinė oro drėgmė 60 ± 10 %), paviršius nudažytas PFINDER 902 fluorescenciniais dažais, po 15 minučių paviršius padengtas PFINDER 970 fluorescencinių dažų ryškalu. Atsiradusiems įtrūkiams aptikti panaudotas optinis mikroskopas OLYMPUS BX51TF ir ultravioletinių spindulių lempa O-FLB, kurios pagrindiniai parametrai: šviesos stipris – 15 000 cd/m², bangos ilgis – 360 nm, lempos ilgis – 30 cm.

Betono susitraukimo deformacijų matavimas. Pradinės betono susitraukimo deformacijos buvo nustatytos po 16 valandų nuo mišinio užmaišymo pradžios. Susitraukimo deformacijoms matuoti buvo suformuoti $4 \times 4 \times 16$ cm bandiniai. Išformuoti bandiniai buvo laikomi laboratorijos sąlygomis (santykinė oro drėgmė 40–60 %, aplinkos temperatūra – 20 ± 2 °C). Matavimai atlikti laboratoriniu dilatometru 107133-4P97X. Pagrindinės dilatometro savybės (Testing GmbH): tikslumas – 0,001 mm, prietaisas tenkina LST EN 12617-4:2003, LST EN 1367-4:2008 ir LST EN 12808-4:2009 reikalavimus.

Pagreitintas šarminės korozijos nustatymo metodas. Bandymas atliktas pagal Miuncheno technikos universiteto sukurtas rekomendacijas. Šios rekomendacijos labai panašios į RILEM sukurtą metodiką RILEM TC 219-ACS (*Alkali-Aggregate Reaction in concrete structures*) AAR-2. Atliekant matavimus taikyta ta pati įranga, kuri aprašyta betono susitraukimo deformacijų bandymuose. Bandymo metu išformuotų bandinių ($10 \times 40 \times 160$ ir $40 \times 40 \times 160$ mm) paviršiai ir kampai buvo apvalyti šlifavimo popieriumi, o paruošti bandiniai pamerkti į distiliuotą vandenį (laikymo trukmė – 1 para, temperatūra – 80 °C). Po paros buvo išmatuotas bandinių atskaitos taškas ir bandiniai 14 parų įmerkti į 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpalą. Pagal šį metodą kritinė bandinių išsiplėtimo riba – 1,00 mm/m. Bandymo metu buvo matuojami masės ir ilgio pokyčiai.

Cemento hidratacijos tyrimas pusiau adiabatinio metodu. Šiuo metodu buvo registruojamas cemento tešloje su aktyviaisiais mineraliniais ir cheminiais priedais temperatūros pokytis ir įvertinami cemento tešlos kietėjimo parametrai. Metodas atliktas pagal LST EN 196-9:2010.

Dinaminė mišinio klampa. Dinaminė betono mišinio klampa nustatyta modifikuotu Stokso (skęstančio rutulio) metodu, panaudojant 10,0 cm aukščio ir 4,7 cm skersmens plastikinį vamzdelį, kuris buvo pripildytas betono mišinio. Eksperimento metu išmatuotas pastoviu greičiu skęstančio plieninio rutuliuko laikas. Rutuliuko padėtis cilindriniam vamzdelyje buvo fiksuojama metalo detektoriumi „Elcometer“. Prieš matuojant padėtį

plieninis rutuliukas buvo suvilgomas vandeniu. Dinaminė mišinio klampa apskaičiuota pagal **2.1 formulę**.

$$\eta = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 \cdot (\rho_{rut} - \rho_{sk})}{9 \cdot \frac{l}{t}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2,4 \cdot r}{R}}; \quad (2.1)$$

čia:

g – laisvojo kritimo pagreitis;

r – plieninio rutuliuko spindulys;

ρ_{rut} – plieninio rutuliuko tankis;

ρ_{sk} – betono mišinio tankis;

R – plastikinio cilindro spindulys;

l – pastovaus plieninio rutuliuko skendimo kelias, per laiką t .

Pucolaninis aktyvumas. Aktyviųjų mineralinių priedų pucolaninis aktyvumas nustatytas Čapelio metodu (angl. *Chapelle test*). Nustatyta, kiek maksimaliai pucolaninis priedas gali surišti laisvųjų kalkių. Prieš bandymą naudojamos kalkės (CaO) kaitintos 1000 °C temperatūroje, kad būtų išvengta susidariusių karbonatų (CaCO₃). Bandymo metu 1 g aktyviojo mineralinio priedo buvo homogenizuojama su 2 g išdegtųjų kalkių ir užpilta 250 ml distiliuoto vandens. Gauta suspensija palikta 16 valandų maišytis ant magnetinės maišyklės, kurioje nustatyta 90 °C temperatūra. Po 16 valandų gautas tirpalas atvėsintas iki kambario temperatūros. Atvėsintas tirpalas sumaišytas su 60 g sacharozės ir paliktas dar papildomai 15 min maišytis. Naujasis tirpalas buvo filtruojamas per ALBET įmonės filtrinį popierių, kurio pagrindinės savybės: modelis – 414; filtracijos greitis – 1,1352 s/100 ml; filtro akučių skersmuo – 3–5 µm. Į gautą tirpalą buvo įlašinami keli lašai indikatorinio tirpalo (0,1 % fenolftaleino) ir pipete titruojamas su 0,1 N HCl tirpalu. Bandymas atliktas du kartus su ir be pucolaninio priedo. Titruojant nustatytas Ca(OH)₂ tirpalo koncentracijos sumažėjimas ir apskaičiuota, kiek 1 g aktyviojo mineralinio priedo surišo CaO. Metodo tikslumas – ±10 %.

Ultragarso sklidimo greitis ir dinaminis tamprumo modulis. Ultragarso sklidimo greičio bandymas atliktas pagal LST 1428.10:1996, o dinaminio tamprumo modulio bandymas – pagal LST EN 14146:2004. Tiek ultragarso sklidimo greitis, tiek dinaminis tamprumo modulis buvo nustatytas prizmelės formos bandiniuose (4×4×16 cm).

Lenkimo ir gniuždymo stipris. Lenkimo (naudojant 40×40×160 mm formos prizmes) ir gniuždymo stipris (naudojant $d = 50$ mm ir $h = 50$ mm formos cilindrus) buvo nustatytas po 28 parų, atitinkamai pagal LST EN 12390-5:2009/P:2011 ir LST EN 12390-4:2003. Prieš gniuždymo bandymą, kad būtų gauti lygiagretūs paviršiai, bandiniai buvo šlifuojami šlifavimo mašina MPS2 121, kurios pagrindiniai parametrai: variklio galia – 2,20 kW; veleno sukimosi greitis – 2560 min⁻¹. Bandinių paviršių lygiagretumas patikrintas pagal LST EN 12390-1:2012.

3. CEMENTO AKMENS STRUKTŪROS FORMAVIMAS IR STRUKTŪROS ANALIZĖ

3.1. Cemento akmenų struktūros formavimas

Cemento akmenų struktūra suformuota pagal Brouwers (2005) sukurtą modelį. Modelis skirtas prognozuoti, kaip keisis cemento akmenų struktūros parametrai esant skirtingoms V/R ir hidratacijos laipsnio (α) vėrtėms. Pasiūlytas modelis yra patobulinta Powers (1946) modelio versija.

3.1 lentelė. Ypač stipraus betono sudėtys

Sudėtis	V/C	V _{ef} /C	V/R	Vanduo, kg/m ³	Cementas ^[1] , kg/m ³	Mikroužpildas, kg/m ³			Kvarcinis smėlis ^[5] #0/1,6, kg/m ³	SP ^[6] , kg/m ³
						Silicio mikrodulkės ^[2]	Maltas kvarcinis smėlis ^[3]	Maltas stiklas ^[4]		
C735+0SiO ₂ +0MS+5%SP	0,25	0,3	0,25	184	735	–	511	–	962	36,8
	0,27	0,32	0,27	198						
	0,29	0,34	0,29	213						
	0,31	0,36	0,31	228						
	0,33	0,38	0,33	242						
C735+99SiO ₂ +0MS+5%SP	0,25	0,3	0,21	184	735	99	412	–	962	36,8
	0,27	0,32	0,22	198						
	0,29	0,34	0,24	213						
	0,31	0,36	0,26	228						
	0,33	0,38	0,27	242						
C735+0SiO ₂ +511MS+5%SP	0,25	0,3	0,18	184	735	–	–	511	962	36,8
	0,27	0,32	0,19	198						
	0,29	0,34	0,2	213						
	0,31	0,36	0,22	228						
	0,33	0,38	0,23	242						
C735+99SiO ₂ +412MS+5%SP	0,25	0,3	0,16	184	735	99	–	412	962	36,8
	0,27	0,32	0,17	198						
	0,29	0,34	0,19	213						
	0,31	0,36	0,2	228						
	0,33	0,38	0,21	242						

Pastaba: V_{ef} – efektyvus vandens kiekis, įvertintas esamas ir papildomas vandens kiekis, esantis superplastiklyje. ¹AB „Akmenės cementas“. ²Silicio mikrodulkės, UAB „BASF“. ³Maltas kvarcinis smėlis, AB „Anykščių kvarcas“. ⁴Maltas stiklas. ⁵#0/1,6 mm frakcijos kvarcinis smėlis, AB „Anykščių kvarcas“. ⁶Modifikuotas superplastiklis.

Esminis skirtumas tarp Brouwers (2005) ir kitų modelių yra tas, jog modelis skirtas prognozuoti cemento akmenų struktūros parametrams esant mažoms V/C vėrtėms (0,27–0,32). Šiame eksperimentinių tyrimų etape Brouwers (2005) modelis yra pritaikytas prognozuoti, kaip keisis ypač stipraus betono cemento akmenų struktūra esant

skirtingiems V/R santykiams (**3.1 lentelė**). Skaičiuojant struktūros parametrus buvo vertintas V/R santykis ir rišiklio hidratacijos laipsnis.

Skaičiuojant cemento hidratacijos laipsnį buvo įvertinta cemento mineraloginė sudėtis. Skaičiuojant rišiklio hidratacijos laipsnį buvo laikomasi prielaidos, kad cementas su aplinkoje esančia drėgme nereagavo, o cheminių reakcijų metu karbonizacijos procesas neįvyko. Skaičiuojant vandens ir rišiklio santykį buvo įvertintas superplastiklyje esančio vandens kiekis. Visose nagrinėtose sudėtyse V/C santykis kito nuo 0,25 iki 0,33, kitimo intervalas – 0,02. Vandens ir rišiklio santykis apskaičiuotas pagal LST EN 206:2014 pasiūlytą **3.1 formulę**.

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{(C + k \cdot x)}; \quad (3.1)$$

čia:

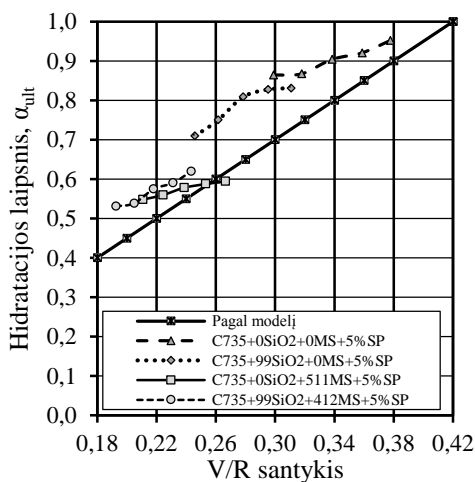
V/R – vandens ir rišiklio santykis;

V – vandens kiekis;

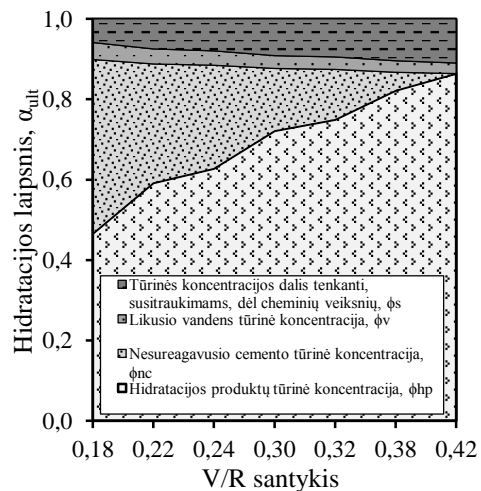
C – cemento kiekis;

k – aktyvumo koeficientas ($k = 0,6$, kai maltas stiklas ir $k = 1,6$, kai silicio mikrodulkės);

x – aktyviojo mineralinio priedo kiekis.



3.1 pav. Vandens ir rišiklio santykio įtaka hidratacijos laipsniui, kai cemento akmenyje panaudotas skirtingas kiekis aktyviojo mikroužpildo



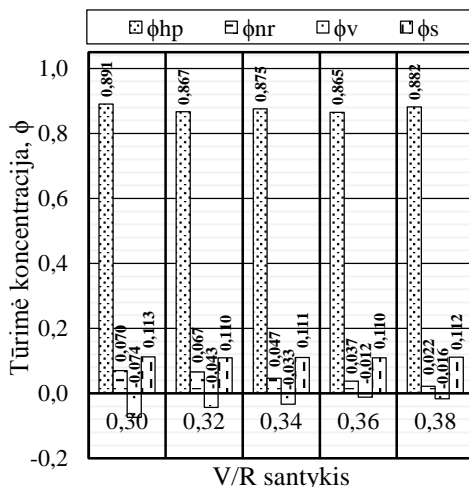
3.2 pav. Pagal modelį susidariusių hidratacijos produktų (ϕ_{hp}), nesureagavusio cemento (ϕ_{nc}), likusio vandens (ϕ_v) ir susitraukimo (ϕ_s) dėl cheminių veiksnių tūrinių koncentracijų priklausomybė nuo V/R santykio ir maksimalaus hidratacijos laipsnio

Pagal ankstesnį Powers (1946) modelį, kai hidratacijos procesui naudojamas tik cemento tešloje esantis vanduo, teoriškai maksimalus rišiklio hidratacijos laipsnis ($\alpha_{ult} = 1,00$) yra pasiekiamas, kai $V/R = 0,42$ (**3.1 paveikslas**). Pagal tuos pačius pradinis parametrus apskaičiuotas ir susidariusių hidratacijos produktų, nesureagavusio cemento, likusio vandens kiekis ir susitraukimo dėl cheminių veiksnių tūrinės koncentracijos

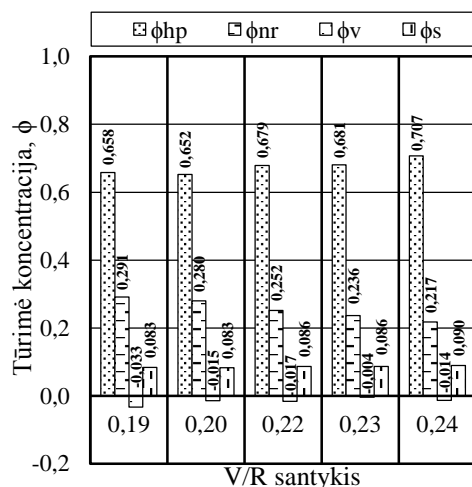
(3.2 paveikslas). Vėliau Brouwers (2005) patobulino modelį ir nustatė, kai cemento akmuo laikomas esant 100 % santykinės drėgmei, maksimalus hidratacijos laipsnis ($\alpha_{ult} = 1,00$) galimas ir esant žemesnei V/R santykio vertei ($V/R = 0,27-0,32$), tačiau turi būti suteiktos tam tikros aplinkos sąlygos.

Brouwers (2005) pateikia įvairias išraiškas, pagal kurias galima suskaičiuoti cemento akmens struktūros parametrus tam tikromis kietinimo sąlygomis. Toliau skaičiuota taikant formules, pagal kurias galima prognozuoti cemento akmens struktūros parametrus, kai bandiniai laikomi esant 100 % santykinei drėgmei. Modelis su pateiktomis formulėmis plačiau aprašytas literatūros analizėje. Kur kas įdomesni rezultatai pastebėti, kai buvo tirta, kaip V/R santykis ir eksperimentiniais tyrimais nustatytas rišiklio hidratacijos laipsnis pakeitė susidariusių hidratacijos produktų (ϕ_{hp}), nesureagavusio cemento (ϕ_{nr}), likusio vandens (ϕ_v) ir susitraukimo (ϕ_s) dėl cheminių veiksnių tūrinės koncentracijas (3.3 ir 3.4 paveikslai). Kaip ir buvo tikėtasi, visose nagrinėtose sudėtyse, didėjant V/R santykiui, nesureagavusio rišiklio tūrinė koncentracija proporcingai mažėjo, o hidratacijos produktų tūrinė koncentracija proporcingai didėjo.

Daugiausia nesureagavusio rišiklio pastebėta esant toms betono mišinio sudėtims, kurioms esant panaudotas maltas stiklas (3.1 lentelė ir 3.4 paveikslas). Taip pat pastebėta, kad esant sudėtims (C735+0SiO₂+0MS+5%SP, C735+99SiO₂+0MS+5%SP, C735+99SiO₂+412MS+5%SP) be aktyviojo mineralinio mikroužpildo ir su panaudotomis silicio mikrodulkėmis trūksta laisvojo vandens, tačiau mišinyje (C735+0SiO₂+511MS+5%SP), kuriame panaudotas stiklas, yra laisvojo vandens perteklius. Šį faktą galima aiškinti tuo, jog malto stiklo ir silicio mikrodulkių reaktyvumas nėra vienodas. Kaip ir tikėtasi, didesnės susitrauktys dėl cheminių veiksnių pastebėtos tose betono mišinio sudėtyse, kuriose buvo didesnis V/R santykis.

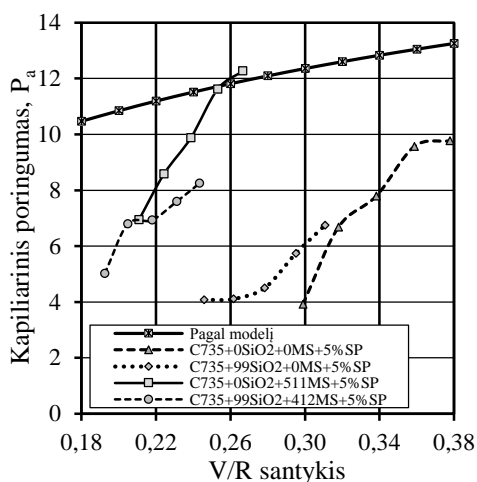


3.3 pav. V/R santykio įtaka hidratacijos produktų (ϕ_{hp}), nesureagavusio cemento (ϕ_{nr}), likusio vandens (ϕ_v) ir susitraukimo (ϕ_s) dėl cheminių veiksnių tūrinėms koncentracijoms, kai cemento akmenyje nepanaudota aktyviojo mineralinio priedo (C735+0SiO₂+0MS+5%SP)

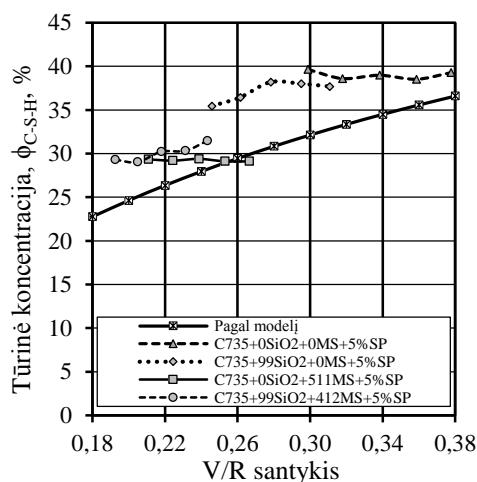


3.4 pav. V/R santykio įtaka hidratacijos produktų (ϕ_{hp}), nesureagavusio cemento (ϕ_{nr}), likusio vandens (ϕ_v) ir susitraukimo (ϕ_s) dėl cheminių veiksnių tūrinėms koncentracijoms, kai cemento akmenyje panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas (C735+99SiO₂+412MS+5%SP)

Pagal modelį taip pat nustatytas cemento akmens su skirtingais aktyviaisiais mikroužpildais kapiliarinis poringumas (**3.5 paveikslas**). Didžiausias kapiliarinis poringumas pastebėtas cemento akmenyje su maltu stiklu ($C735+0SiO_2+511MS+5\%SP$), kintant V/R santykiui nuo 0,21 iki 0,26, rišiklio kapiliarinis poringumas atitinkamai didėjo nuo 6,9 % iki 12,3 %. Mažiausias kapiliarinis poringumas nustatytas, betono mišinyje ($C735+99SiO_2+0MS+5\%SP$) su silicio mikrodulkėmis, kintant V/R santykiui nuo 0,25 iki 0,31, kapiliarinis poringumas kito nuo 4,1 % iki 6,7 %. Kitų sudėčių kitimo tendencijos taip pat panašios. Nors Brouwers (2005) pateikia formules, pagal kurias galima suskaičiuoti cemento akmens kapiliarinį poringumą, tačiau realiomis sąlygomis gautas kapiliarinis poringumas gali labai skirtis nuo pritaikytų technologinių sąlygų: vibravimo pobūdžio, kietinimo režimo, granulimetrinės mišinio sudėties, tolesnio hidratacijos proceso ir t. t.



3.5 pav. Vandens ir rišiklio santykio įtaka kapiliariniam poringumui, kai cemento akmenyje panaudotas skirtingas aktyviojo mikroužpildo kiekis



3.6 pav. Vandens ir rišiklio santykio įtaka tūrinei C-S-H koncentracijai, kai cemento akmenyje panaudotas skirtingas aktyviojo mikroužpildo kiekis

Taip pat pagal modelį buvo suskaičiuota, kaip kinta C-S-H tūrinė koncentracija nuo panaudoto aktyviojo mineralinio priedo (**3.6 paveikslas**). Mažiausia tūrinė koncentracija pastebėta betono mišinio sudėtyse ($C735+0SiO_2+511MS+5\%SP$ ir $C735+99SiO_2+412MS+5\%SP$), kuriose buvo panaudotas maltas stiklas: kintant V/R santykiui nuo 0,21 iki 0,27, C-S-H tūrinė koncentracija atitinkamai kito nuo 0,290 iki 0,315 (**3.2 lentelė**). Betono mišinyje ($C735+0SiO_2+0MS+5\%SP$) be aktyviųjų mineralinių priedų, kintant V/R santykiui nuo 0,30 iki 0,38, C-S-H tūrinė koncentracija atitinkamai kito nuo 0,396 iki 0,393. Apie 34 % susidariusio C-S-H tūrio užima gelio poros.

Šiame ypač stipraus betono struktūros formavimo etape pagal taikytą modelį buvo nesunkiai suskaičiuoti cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu tam tikri struktūros parametrų rodikliai. Modelio pateikiamos tūrinių koncentracijų vertės tam tikrais atvejais gali būti gana sudėtingai sulyginamos, kai, keičiantis V/R santykiui, keičiasi daugiau nei keli struktūros parametrai.

3.2 lentelė. Hidratacijos naujadarų (ϕ_{hp}), nesureagavusio rišiklio (ϕ_{nr}), nesureagavusio vandens (ϕ_v), susitraukimo deformacijų (ϕ_s), kapiliarinio poringumo (P_a) ir C-S-H (ϕ_{C-S-H}) tūrinės koncentracijos

Sudėtis	V/R	α	Tūrinė koncentracija, ϕ					
			ϕ_{hp}	ϕ_{nc}	ϕ_v	ϕ_s	P_a	ϕ_{C-S-H}
C735+0SiO ₂ +0MS+5%SP	0,30	0,86	0,891	0,070	-0,074	0,113	0,039	0,396
	0,32	0,87	0,867	0,067	-0,043	0,110	0,067	0,386
	0,34	0,90	0,875	0,047	-0,033	0,111	0,078	0,390
	0,36	0,92	0,865	0,037	-0,012	0,110	0,096	0,385
	0,37	0,95	0,882	0,022	-0,016	0,112	0,098	0,393
C735+0SiO ₂ +511MS+5%SP	0,21	0,55	0,659	0,272	-0,014	0,084	0,069	0,293
	0,23	0,56	0,656	0,258	0,003	0,083	0,086	0,292
	0,24	0,58	0,660	0,241	0,015	0,084	0,099	0,294
	0,25	0,59	0,654	0,230	0,033	0,083	0,116	0,291
	0,26	0,59	0,654	0,223	0,040	0,083	0,123	0,291
C735+99SiO ₂ +412MS+5%SP	0,20	0,53	0,658	0,291	-0,033	0,083	0,050	0,293
	0,21	0,54	0,652	0,280	-0,015	0,083	0,068	0,290
	0,22	0,57	0,679	0,252	-0,017	0,086	0,069	0,302
	0,23	0,59	0,681	0,236	-0,004	0,086	0,076	0,303
	0,24	0,62	0,707	0,217	-0,014	0,090	0,083	0,315
C735+99SiO ₂ +0MS+5%SP	0,25	0,71	0,796	0,163	-0,060	0,101	0,041	0,354
	0,27	0,75	0,818	0,137	-0,059	0,104	0,041	0,364
	0,28	0,81	0,858	0,102	-0,068	0,109	0,045	0,382
	0,30	0,83	0,854	0,089	-0,051	0,108	0,057	0,380
	0,31	0,83	0,846	0,086	-0,040	0,107	0,067	0,377

Deja, modelis negali atsakyti, kiek lieka konkretaus nesureagavusio rišiklio, tačiau pagal gautus rezultatus pastebėta, jog, didėjant rišiklio kiekiui ir mažėjant V/R santykiui, mišinyje liks labai didelis kiekis nesureagavusio rišiklio. Ekonominiu požiūriu tai nėra racionalu, nes nesureagavęs rišiklis lieka kaip brangus mikroužpildas, tačiau struktūriniu požiūriu su didesniu rišiklio kiekiu visada susidarys santykinai didesnis C-S-H kiekis, o tai turės teigiamą įtaką betono ilgalaikiškumui ir tolesniam gniuždymo stiprio didėjimui. Modelis taip pat neatsako į klausimus, kiek hidratacijos metu susidarė portlandito, kokio tipo susidarė C-S-H, kaip pasiskirsčiusios poros, neįvertina skirtingų aktyviųjų mineralinių priedų aktyvumo ir kt. Šie veiksniai bus tiriami kituose disertacijos etapuose.

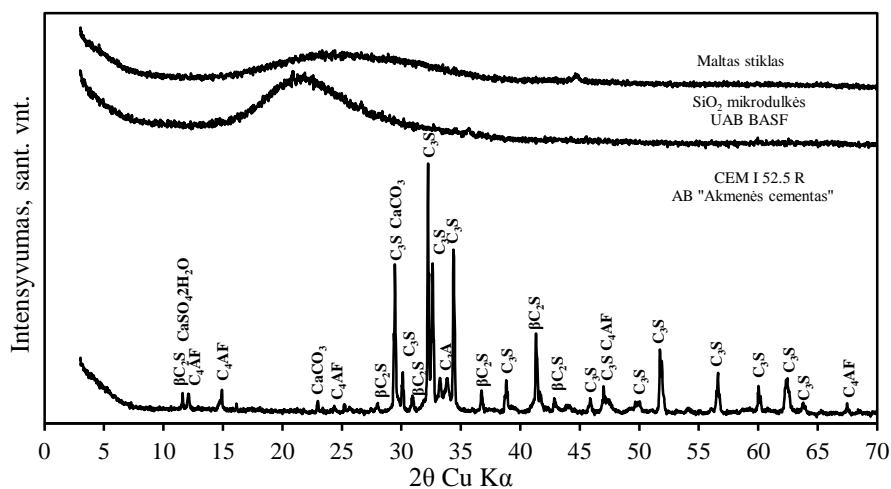
3.2. Cemento akmens struktūros analizė

3.2.1. Aktyviųjų mineralinių priedų cheminė analizė ir pucolaninis aktyvumas

Eksperimentinio tyrimo metu stiklo duženos buvo malamos rutuliniu malūnu. Paruošimo metodika pateikta skyriuje „Tyrimo metodai“. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių pucolaninis aktyvumas nustatytas Čapelio metodu. Cemento, silicio mikrodulkių ir malto stiklo žaliavų rentgenogramos pateiktos **2.13 paveiksle**. Malto stiklo cheminė analizė atlikta Miuncheno technikos universiteto mokslininkų. Kad būtų galima nustatyti malto stiklo cheminę sudėtį, stiklas buvo lydytas su ličio metaboratu, lydalas tirpintas azoto rūgštyje, o gautas tirpalas analizuotas indukcinės plazmos optinės emisijos spektrometru.

Pateiktose rentgenogramose (**3.7 paveikslas**) galima pastebėti, jog tiek maltas stiklas, tiek silicio mikrodukės yra grynai amorfinės medžiagos ir neturi kristalinių medžiagoms būdingų smailių. Lyginant silicio mikrodukėlių ir malto stiklo cheminę sudėtį (**2.1 lentelė**) galima pamatyti, jog silicio mikrodukėse dominuoja vienintelis junginys SiO_2 (97,60 %), kitų junginių kiekiai yra nedideli, todėl silicio mikrodukėlių reaktyvumas daugiausia priklausys nuo medžiagos smulkumo. Maltame stikle yra kur kas daugiau junginių, pagrindiniai iš jų amorfinės struktūros SiO_2 (72,76 %), Al_2O_3 (1,67 %), MgO (2,09 %) CaO (>9,00 %) ir Na_2O (12,56 %), taip pat aptiktas nedidelis kiekis SO_3 (0,10 %). Maltame stikle, lyginant su silicio mikrodukėmis, yra apie 25 % mažesnis amorfinio SiO_2 kiekis. Todėl malto stiklo aktyvumas daugiausia priklausys ne tik nuo medžiagos smulkumo, bet ir nuo amorfinio SiO_2 ir Al_2O_3 kiekio.

Amorfinės struktūros junginiai SiO_2 ir Al_2O_3 hidratacijos metu linkę sudaryti C-S-H ar C-A-H junginius, todėl neigiamos įtakos cheminiams procesams neturės. CaO ir MgO paprastai aptinkami tik cemente ir yra linkę reaguodami su vandeniu plėstis ir didinti tūrį (iki 118 %).

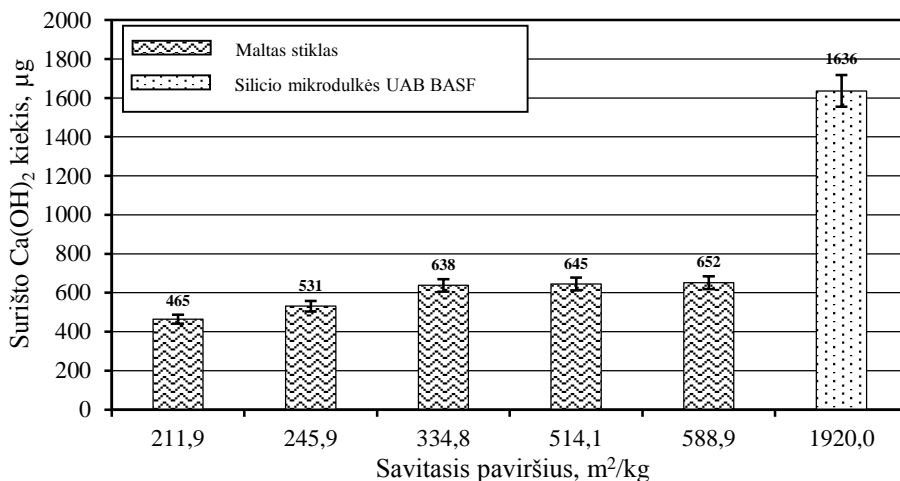


3.7 pav. Nehidratavusio cemento, silicio mikrodukėlių ir malto stiklo rentgenogramos

Didesnis kiekis SO_3 junginio gali sulėtinti cemento tešlos hidratacijos procesą. Dėl Na_2O ir K_2O vyksta intensyvios mokslininkų diskusijos. Daugelio mokslininkų nuomonės sutampa, kai mišinyje naudoti tam tikri reaktyvieji užpildai (opalas, titnagas, chalcedonas ir kt.) ir, kai yra didesni kiekiai Na_2O ir K_2O , gali įvykti reaktyviųjų užpildų destrukcija (vyksta šarminė korozija). Kita dalis mokslininkų, naudodami įvairius cheminius priedus (tarp kurių yra ir Na_2O ir K_2O), bando suintensyvinti pucolaninių priedų (tokių kaip silicio mikrodukėlių, lakiųjų pelenų ir aukštakrosnių šlako) reaktyvumą ir padidinti pucolaninės reakcijos procesą.

Pagal cheminę sudėtį maltas stiklas artimesnis portlandcemenčiui nei silicio mikrodukėms. Todėl teoriškai smulkiai sumaltas stiklas dėl savo amorfinės struktūros turėtų elgtis panašiai kaip silicio mikrodukės. Deja, cheminė ir rentgenografinė analizė neatsako į klausimą, kiek maltas stiklas ir silicio mikrodukės pucolaninės reakcijos metu maksimaliai gali surišti portlandito (CH). Tai greičiausiai priklausys nuo žaliavos smulkumo.

Čapelio metodas buvo pritaikytas siekiant nustatyti, kiek gali silicio mikrodulkės ir skirtingo smulkumo maltas stiklas surišti portlandito. Pastebėta (**3.8 paveikslas**), jog kintant malto stiklo savitajam paviršiui nuo 2119 cm²/g iki 5889 cm²/g, maksimaliai surišto Ca(OH)₂ kiekis atitinkamai pakito apie 40 %, nuo 465 μg iki 652 μg. Iš gautų rezultatų galima teigti, jog optimalus malto stiklo smulkumas yra apie 3350 cm²/g, toliau, didėjant stiklo smulkumui, surišto portlandito (CH) kiekis praktiškai nebekinta, todėl tolesnis žaliavos malimas nėra racionalus.



3.8 pav. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių savitojo paviršiaus įtaka surišto Ca(OH)₂ kiekiui

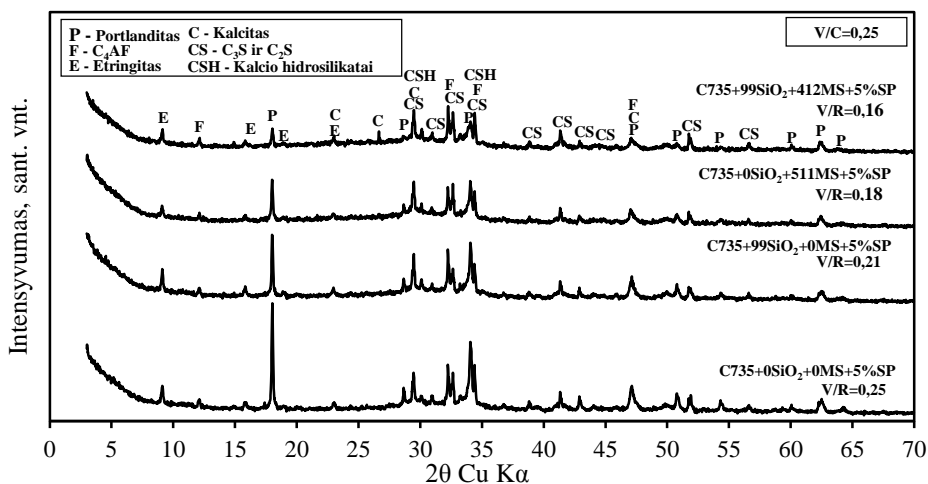
Pastebėtas įdomus faktas: silicio mikrodulkės suriša portlandito apie tris kartus daugiau nei maltas stiklas. Silicio mikrodulkių smulkumas, nustatytas Bleino prietaisu, yra taip pat apie tris kartus didesnis. Čapelio metodu nustatytas maksimaliai galimas surišto Ca(OH)₂ kiekis yra gautas idealizuotomis sąlygomis, kai aktyvusis mineralinis priedas yra disperguojamas 24 valandas vandeningoje sistemoje. Realiomis sąlygomis vandens kiekiai cemento sistemose būna kur kas mažesni, todėl realus surišto portlandito kiekis taip pat gali būti mažesnis. Realiomis sąlygomis surišto portlandito (CH) kiekis nustatytas taikant termografinės ir kiekybinės rentgenografinės analizės metodus, kurie bus išsamiau panagrinėti tolesniuose eksperimentiniuose etapuose.

3.2.2. Vandens ir cemento santykio įtaka

Siekiant nustatyti, kaip vandens ir cemento santykis paveiks cemento akmens su skirtingais mineraliniais priedais struktūrą, buvo padarytos įvairios priklausomybės. Eksperimentinio tyrimo metu tirtos betono mišinio sudėtys pateiktos **3.1 lentelėje**. Nagrinėtose betono mišinio sudėtyse V/C santykis svyravo nuo 0,25 iki 0,33. Efektyvus vandens ir cemento santykis, įvertinant papildomą vandens, esančio superplastiklyje kiekį, svyravo nuo 0,30 iki 0,38. Vandens ir rišiklio santykis nustatytas pagal LST EN 206:2014. Skaičiuojant rišiklio kiekį buvo tarta, jog malto stiklo ir silicio mikrodulkių aktyvumo koeficientai atitinkamai yra $K_{MS} = 0,6$ ir $K_{SM} = 1,6$. Cemento akmens su įvairiais mineraliniais priedais, esant skirtingiems V/C santykiams, priklausomybės tirtos

pasitelkiant rentgenografinę ir termografinę analizę. Bandiniai 28 paras buvo kietinti 20 °C temperatūros vandenyje.

Tiriant cemento akmenis su skirtingu aktyviųjų mineralinių priedų kiekiu rentgenogramas, kai $V/C = 0,25$ (**3.9 paveikslas**), buvo identifikuoti pagrindiniai hidratacijos metu susidarę naujadarai ir nesureagavusio klinkerio mineralai. Pagrindinių nesureagavusio klinkerio mineralų būdingi atstumai tarp atominių plokštumų: nehidratuoto C_3S ($d = 0,3036; 0,2773; 0,2748; 0,2604; 0,2181$ nm) ir C_2S ($d = 0,2790; 0,2783; 0,2745; 0,2645; 0,2610; 0,2189$ nm). Cemento akmenyje su skirtingais aktyviaisiais mineraliniais priedais aptikti šie pagrindiniai hidratacijos metu susidarę naujadarai: kalcio hidrosilikatai ($d = 0,3042; 0,2789; 0,1924$ nm), portlanditas ($d = 0,4901; 0,2629; 0,1928; 0,1796; 0,1687$ nm), etringitas ($d = 0,9782; 0,5629$ nm) ir kalцитas ($d = 0,3036; 0,2286; 0,2100; 0,1913; 0,1878$ nm). Panašios tendencijos pastebėtos ir tiriant cemento akmenis su skirtingais mineraliniais priedais bandiniuose, esant didesniai ($V/C = 0,33$) santykiui.

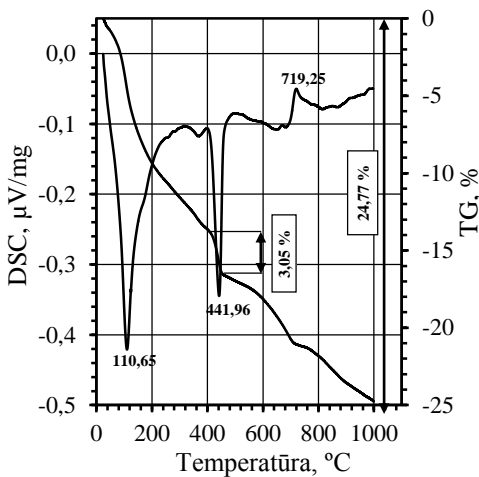


3.9 pav. Cemento akmenis su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu rentgenograma ($V/C = 0,25$)

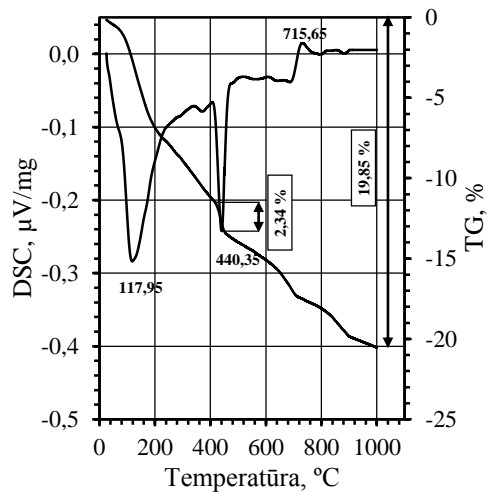
Nagrinėjant betono mišinio sudėtis su panaudotais skirtingais aktyviaisiais mineraliniais priedais, nustatyta, jog betono mišinyje, kai buvo panaudotas maltas stiklas ($C735+0SiO_2+511MS+5\%SP$), portlanditui būdingų charakteringų smailių intensyvumas yra kur kas mažesnis nei betono mišinyje ($C735+99SiO_2+0MS+5\%SP$), kuriame panaudotos silicio mikrodulkės. Efektyviausias portlandito sumažėjimas pastebėtas betono mišinyje ($C735+99SiO_2+412MS+5\%SP$), kuriame buvo panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas. Nors silicio mikrodulkės yra gerokai efektyvesnis pucolaninis priedas nei maltas stiklas, tačiau, naudojant maltą stiklą betono mišinyje, dėl didesnio pridėto malto stiklo kiekio atsiranda santykinai didesnis kiekis amorfinio SiO_2 , dėl kurio pucolaninės reakcijos metu surišamas didesnis kiekis $Ca(OH)_2$.

Taip pat pastebėtas įdomus faktas, jog betono mišinio sudėtyse ($C735+0SiO_2+511MS+5\%SP$ ir $C735+99SiO_2+412MS+5\%SP$), kuriuose panaudotas maltas stiklas, buvo pastebėtas šiek tiek didesnis kalцитui būdingų smailių intensyvumas ir mažesnis nesureagavusio klinkerio mineralams (C_3S ; C_2S ; C_3A ir C_4AF) būdingų smailių intensyvumas. Mažesnis kalcio silikatams (C_3S ir C_2S) būdingų smailių

intensyvumas leidžia daryti prielaidą, jog maltas stiklas didina klinkerio mineralų hidrataciją. Tačiau kiek lieka nesureagavusio klinkerio mineralų, šis bandymas neatsako. Kodėl betono mišinio sudėtyse, kuriose buvo panaudotas maltas stiklas, susidarė intensyvesnės kalcitui būdingos smailės, sunku atsakyti, tačiau viena iš prielaidų galėtų būti tokia: maltame stikle yra apie 10 % CaO, kuris galbūt gali reaguoti su atmosferoje esančiu CO₂. Iš analizuojamos rentgenogramos (**3.9 paveikslas**) sunku pasakyti, ar maltas stiklas kaip pucolaninis priedas yra aktyvus, tačiau surišto portlandito kiekis daugiausia priklausys nuo malto stiklo smulkumo, kietinimo temperatūros ir laiko. Portlandito kiekis, nespėjantis sureaguoti pucolaninės reakcijos metu, reaguoja su atmosferoje ar vandenyje ištirpusiu CO₂ ir sudaro kalcitą. Kalcito kiekis galėtų būti šiek tiek sumažintas naudojant aktyvesnius pucolaninius priedus arba intensyvinant hidratacijos procesą, tačiau visiško kalcito susidarymo išvengti nepavyks. Pastebėta, jog naudotų silicio mikrodulkių pucolaninis aktyvumas yra kur kas didesnis tuomet, kai nagrinėtoje cemento sistemoje yra didesnis V/C santykis.

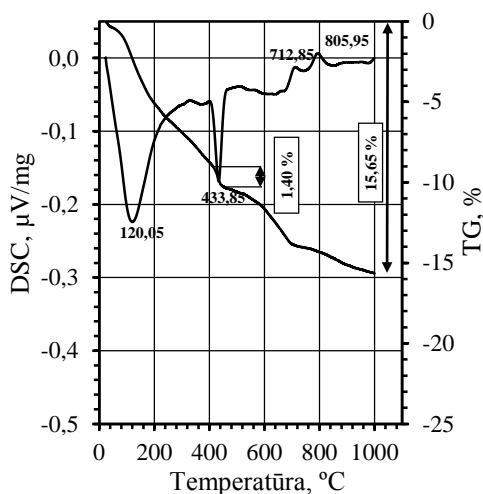


3.10 pav. Cemento akmens be aktyviojo mineralinio priedo (C735+0SiO₂+0MS+5%SP) termograma (V/C = 0,25)

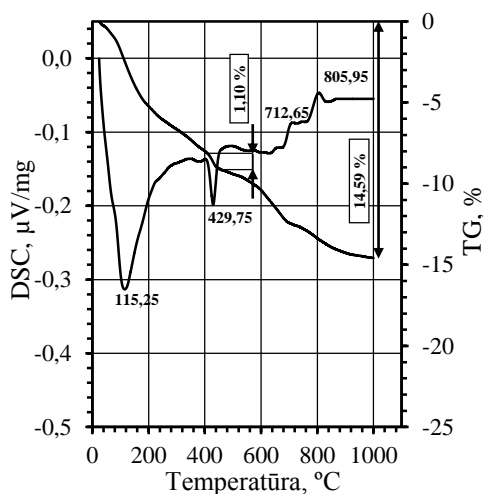


3.11 pav. Cemento akmens su silicio mikrodulkėmis (C735+99SiO₂+0MS+5%SP) termograma (V/C = 0,25)

Esant mažesniai V/C santykiui maltas stiklas kur kas efektyvesnis pucolaninis priedas nei silicio mikrodulkės. Greičiausiai dėl to, jog silicio mikrodulkių dalelės yra kur kas labiau linkusios aglomeruotis nei malto stiklo dalelės. Kadangi eksperimentinio tyrimo metu nebuvo taikytas terminis apdorojimas, pastebėta, jog esant mažam V/C santykiui, silicio mikrodulkės nėra tokios veiksmingos kaip maltas stiklas, tačiau pritaikius terminį apdorojimą silicio mikrodulkių aktyvumas gali gerokai pasikeisti. Kaip terminis apdorojimas pakeis silicio mikrodulkių aktyvumą, bus nagrinėjama vėlesniuose skyriuose. Tačiau iš nagrinėtų rentgenogramų negalima atsakyti, kiek liko nesureagavusio cemento, kiek susidarė portlandito ir kalcito, taip pat šis metodas tik iš dalies gali patvirtinti minėtą prielaidą, jog maltas stiklas suintensyvina klinkerio mineralų hidrataciją. Siekiant rasti atsakymus į šiuos klausimus, tikslinga nagrinėtas betono mišinio sudėtis patyrinėti kitais instrumentinės analizės metodais.



3.12 pav. Cemento akmens su maltu stiklu ($C735+0SiO_2+511MS+5\%SP$) termograma ($V/C=0,25$)

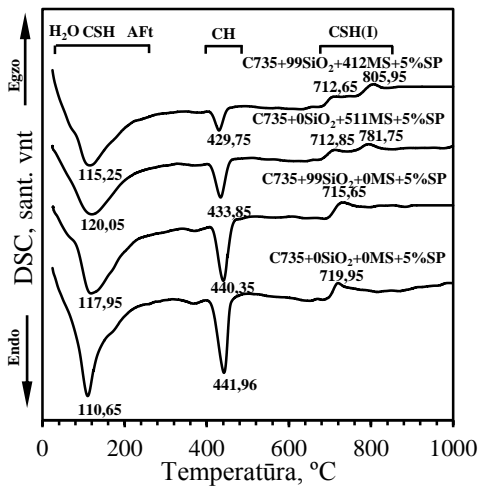


3.13 pav. Cemento akmens su maltu stiklu ($C735+99SiO_2+412MS+5\%SP$) termograma ($V/C=0,25$)

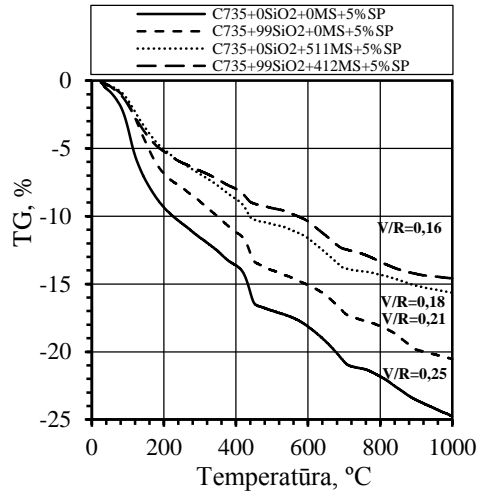
Cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu termografinė analizės rezultatai pateikti **3.10–3.15 paveiksluose**. V/C santykis svyravo nuo 0,25 iki 0,33. Termografinės analizės metu temperatūra kito nuo 25 °C iki 1000 °C. Analizuojant buvo fiksuojami masės nuostoliai (TG) ir energijų skirtumai (DSC). Apibendrintos termogramos pateiktos **3.14 ir 3.15 paveiksluose**. Nagrinėjant termogramas galima išskirti tris reikšmingas temperatūrų zonas:

1. Temperatūrų intervale nuo 25 °C iki 310 °C būdingas platus endoterminis efektas, kuriame vyksta keli reikšmingi fizikiniai procesai. Kadangi šioje zonoje yra vientisa kreivė, tai atskiri vykstantys fizikiniai procesai perdengia vienas kitą, todėl jų kiekybiškai įvertinti negalima. Tačiau atlikus literatūros analizę galima išsamiau panagrinėti šioje zonoje vykstančius procesus. Temperatūrai kintant nuo 25 °C iki 120 °C, būdingas fizikinis procesas, kai iš cemento akmens kapiliarinių porų pasišalina laisvasis vanduo. Pastebėta, jog, nagrinėjant cemento akmens bandinius su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu (kai $V/C = 0,25$), didžiausi masės nuostoliai (–5,54 %) aptikti cemento akmenyje ($C735+0SiO_2+0MS+5\%SP$) be pucolaninių priedų, mažiausi masės nuostoliai (–2,68 %) aptikti cemento akmenyje, kuriame kaip pucolaninis priedas buvo panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas ($C735+99SiO_2+412MS+5\%SP$). Cemento akmenyje su įvairiais pucolaniniais priedais aptiktas mažesnis laisvojo vandens kiekis, nes esant toms sudėtims greičiausiai įvyko intensyvesnis cemento hidratacijos procesas. Temperatūrų intervale nuo 65 °C iki 115 °C būdingas fizikinis ir cheminis procesas, kai cemento akmenyje esantis hidratacijos naujadaras, trisulfatinės formos etringitas (AFt), prarasdamas vandenį, virsta metastabiliu monosulfatinės formos etringitu (AFm). Susidaręs etringitas buvo identifikuotas ir rentgenografinės analizės metodu, tačiau koks tiksliai kiekis susidarė šiuo metodu, atsakyti negalima. Toliau didėjant temperatūrai, gali susidaryti ir kitų etringito modifikacijų (hidrogranatas, β -anhidritas, γ -anhidritas ir kt.), tačiau cemento akmens bandiniai buvo kietinti kambario temperatūros vandenyje (20 ± 2 °C), todėl nėra tikėtina, kad susidarytų šios modifikacijos, tam reikia aukštesnių temperatūrų, tad plačiau jas nagrinėti nėra tikslinga. Kintant temperatūrai nuo 120 °C iki 310 °C, iš cemento akmens

šalinasi fiziškai ir nedidelė dalis chemiškai surišo vandens. Chemiškai surištas vanduo po truputį yra netenkamas iki pat 1000 °C.



3.14 pav. Cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu DSC analizės kreivės ($V/C = 0,25$)

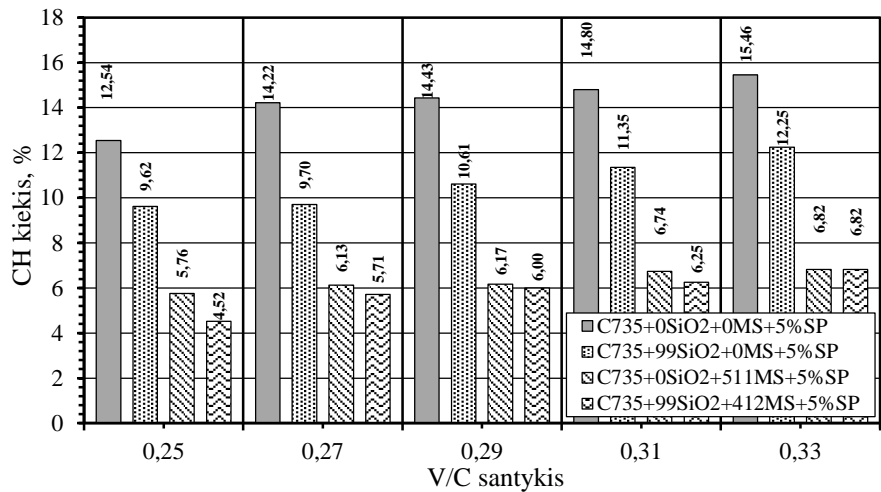


3.15 pav. Cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu TG analizės kreivės ($V/C = 0,25$)

2. Temperatūrų intervale nuo 390 °C iki 480 °C būdingas platus endoterminis efektas, kuriam būdingas vienintelis charakteringas fizikinis efektas – portlandito dehidratacijos procesas ($\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$). Portlanditas taip pat buvo identifikuotas rentgenografinės analizės metodu. Kintant V/C santykiui nuo 0,25 iki 0,33, pagal masės nuostolius buvo apskaičiuotas cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo portlandito kiekis (**3.16 paveikslas**). Kaip ir tikėtasi, didėjant V/C santykiui, visose nagrinėtose sudėtyse portlandito kiekis taip pat proporcingai didėjo. Daugiausia portlandito susidarė cemento akmenyje ($\text{C735}+0\text{SiO}_2+0\text{MS}+5\%\text{SP}$) be pucolaninių priedų. Kintant V/C santykiui nuo 0,25 iki 0,33, atitinkamai portlandito susidarė nuo 12,54 % iki 15,46 %. Mažiausias portlandito kiekis aptiktas cemento akmenyje ($\text{C735}+99\text{SiO}_2+412\text{MS}+5\%\text{SP}$), kuriame buvo panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas. Kintant V/C santykiui nuo 0,25 iki 0,33 portlandito kiekis kito nuo 4,52 % iki 6,82 %. Labai panašus kiekis pastebėtas ir cemento akmenyje, kuriame kaip pucolaninis priedas buvo panaudotas vien tik maltas stiklas ($\text{C735}+0\text{SiO}_2+511\text{MS}+5\%\text{SP}$). Pastebėtas įdomus faktas, jog, nepriklausomai nuo V/C santykio, maltas stiklas surišo daugiau nei du kartus daugiau portlandito, lyginant su silicio mikrodulkėmis.

3. Temperatūrose nuo 690 °C iki 830 °C būdingas platus egzoterminis efektas. Cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu bandiniuose rentgeno grafinės analizės metu buvo identifikuotas kalcitas (CaCO_3) ir kalcio hidrosilikatai (CSH). Įdomu tai, jog temperatūrų intervale nuo 690 °C iki 830 °C nė viename bandinyje neaptikta ryškaus endoterminio efekto, būdingo kalcio karbonatų skilimui ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Tačiau aptiktas egzoterminis efektas, kuris būdingas CSH (I) persikristalizavimui į β -volastonitą. β -volastonitui egzoterminis efektas būdingas esant ~910 °C temperatūrai. Baltakys (2011) tyrimais nustatė, kad esant dideliems Na_2O ir K_2O kiekiams β -volastonitas gali susiformuoti žemesnėje nei įprastai (~910 °C) temperatūroje. Dideli Na_2O ir K_2O kiekiai nagrinėtose sistemose patenka iš panaudoto malto stiklo priedo.

Nagrinėtose betono mišinio sudėtyse, esant vienodiems V/C santykiams, termogramose buvo pastebėta, jog betono mišinio sudėtyse su maltu stiklu egzoterminio efekto kreivės yra kiek intensyvesnės, todėl galima daryti prielaidą, jog šiose betono mišinio sudėtyse gniuždymo stipris taip pat turėtų būti didesnis. Tačiau norint patvirtinti šią prielaidą reikėtų atlikti empirinius tyrimus. Siekiant nustatyti, dėl ko maltas stiklas suriša didesnę kiekį portlandito, tikslinga panagrinėti kitais instrumentinės analizės tyrimo metodais.



3.16 pav. V/C santykio įtaka susidariusiam CH kiekiui

3.2.3. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių kiekio įtaka cemento akmens mikrostruktūrai

Eksperimentinio tyrimo metu nagrinėtose cementinio skiedinio sudėtyse išlaikytas vienodas V/C = 0,25 santykis. Taip pat išlaikytas pastovus efektyvus vandens ir cemento santykis, įvertinant papildomą vandens, esančio superplastiklyje, kiekį $V_{ef}/C = 0,29$. Ypač stipraus betono mišinio sudėtyse maltas kvarcinis smėlis ir silicio mikrodulkės buvo keičiamos maltu stiklu (3.3–3.4 lentelės), o keitimo intervalas – 20 %.

3.3 lentelė. Ypatingai stipraus betono sudėtys, kai maltas kvarcinis smėlis buvo keičiamas maltu stiklu (V/C=0,25)

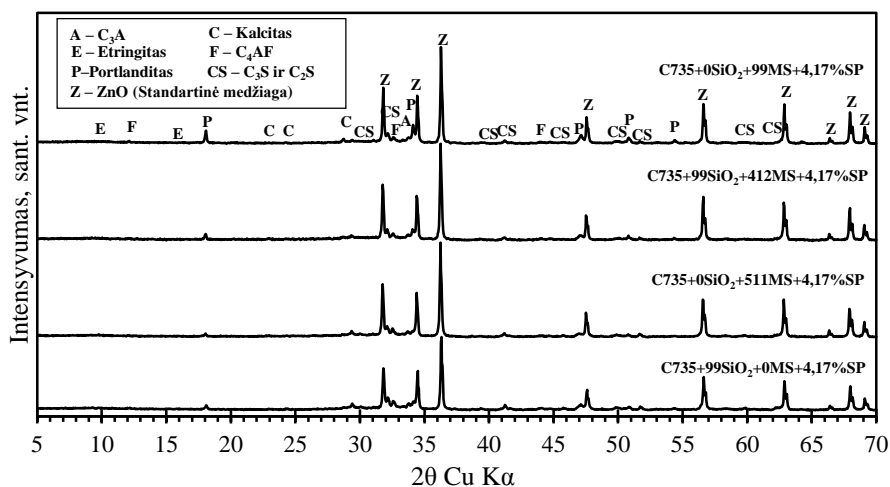
Sudėtis	PL ¹ , %	Vanduo, kg/m ³	Cementas ^[1] , kg/m ³	Mikroužpildas, kg/m ³			Kvarcinis smėlis ^[5] 0/0,5 mm	SP ^[6] , kg/m ³
				Silicio mikrodulkės ^[2]	Maltas kvarcinis smėlis ^[3]	Maltas stiklas ^[4]		
C735+99SiO ₂ +0MS+4,17%SP	0	186	735	99	412	–	962	30,65
C735+99SiO ₂ +82MS+4,17%SP	20				330	82		
C735+99SiO ₂ +165MS+4,17%SP	40				247	165		
C735+99SiO ₂ +247MS+4,17%SP	60				165	247		
C735+99SiO ₂ +412MS+4,17%SP	100				–	412		

3.4 lentelė. Ypač stipraus betono sudėtys, kai silicio mikrodulkės buvo keičiamos maltu stiklu (V/C = 0,25)

Sudėtis	PL ¹ , %	Vanduo, kg/m ³	Cementas, kg/m ³	Mikroužpildas, kg/m ³			Kvarcinis smėlis 0/0.5 mm	SP, kg/m ³
				Silicio mikrodulkės	Maltas kvarcinis smėlis	Maltas stiklas		
C735+0SiO ₂ +511MS+4,17%SP	–	186	735	–	–	511	962	30,65
C735+79SiO ₂ +20MS+4,17%SP	20			79	412	20		
C735+59SiO ₂ +40MS+4,17%SP	40			59		40		
C735+40SiO ₂ +89MS+4,17%SP	60			40		89		
C735+0SiO ₂ +99MS+4,17%SP	100			–		99		

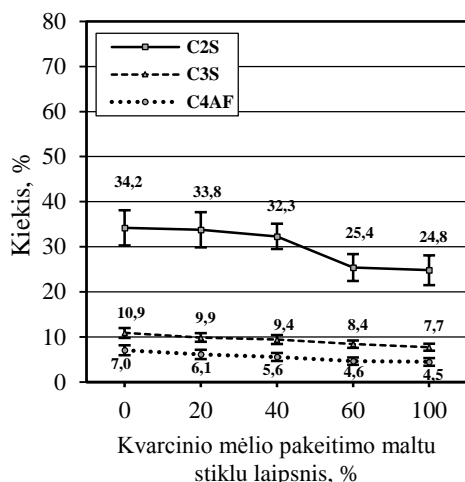
Pastaba: PL – pakeitimo laipsnis; ¹Vokietijos įmonė „Holcim“. ²Silicio mikrodulkės, UAB „Elkem“. ³Maltas kvarcinis smėlis, UAB „Quarzwerke Gruppe“. ⁴Maltas stiklas. ⁵#0/0,5 mm frakcijos kvarcinis smėlis, UAB „Quarzwerke Gruppe“. ⁶Modifikuotas superplastiklis.

Siekiant išvengti netinkamų instrumentinės analizės parodymų, nagrinėjant cemento akmenį su skirtingu malto stiklo ir silicio mikrodulkių kiekiu, nagrinėtose sudėtyse inertinis užpildas kvarcinis smėlis nebuvo naudojamas. Kvarcinis smėlis naudojamas nagrinėjant ypač stipraus betono savybes, kurios bus aprašytos vėlesniuose skyriuose.

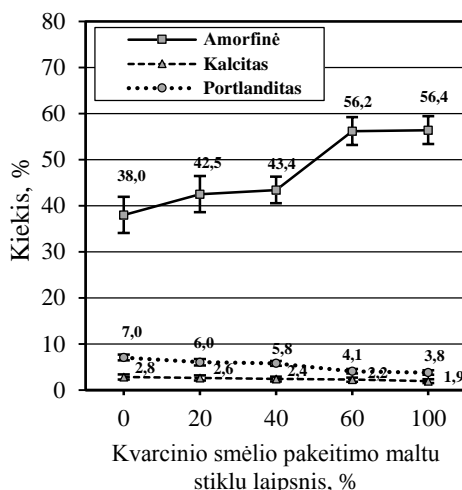


3.17 pav. Cemento akmens su skirtingu malto stiklo kiekiu rentgenograma (V/C = 0,25)

Silicio mikrodulkių ir malto stiklo kiekis atitinkamai kito nuo 0 kg/m³ iki 99 kg/m³ ir nuo 0 kg/m³ iki 511 kg/m³. Cemento akmens bandiniai su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu nagrinėti pasitelkiant kokybinės ir kiekybinės rentgenografinės analizės bei ²⁹Si MAS magnetinio branduolių rezonanso metodus. Cemento akmens bandiniai, išimti iš formų, buvo kietinti šutinimo kameroje esant 80 °C temperatūrai (šutinimo režimas 1+18+3 h). Po šutinimo likusį laiką (iki 28 paros) bandiniai buvo laikyti vandenyje (20±2 °C).



3.18 pav. Malto stiklo kiekio įtaka nehidratuotiems klinkerio mineralams (V/C = 0,25)



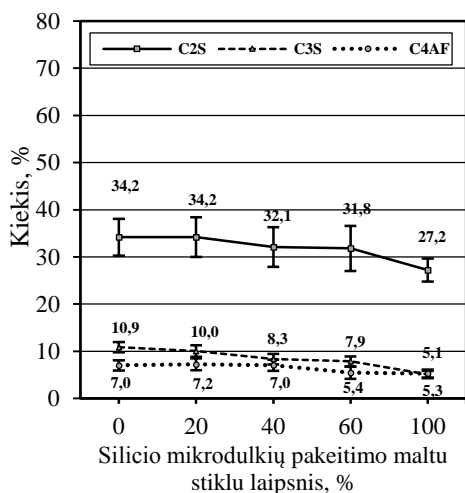
3.19 pav. Malto stiklo kiekio įtaka hidratacijos produktams (V/C = 0,25)

Taikant rentgenografinę struktūros analizės metodą, papildomai taikant Rietveldo aprobovimą, buvo atlikta kokybinė ir kiekybinė analizė (**3.17–3.22 paveikslai**). ZnO buvo naudojamas kaip standartinė medžiaga kiekybinei analizei atlikti. Tiriant cemento akmenis su skirtingu silicio mikrodulkių ir malto stiklo kiekiu rentgenogramas buvo identifikuoti pagrindiniai nesureagavusio klinkerio mineralų ir cemento hidratacijos metu susidarę naujadarai (kalcitas ir portlanditas). Pagrindinių nesureagavusio klinkerio mineralų būdingi atstumai tarp atominių plokštumų: nehidratuoto C_3S ($d = 0,3036; 0,2773; 0,2748; 0,2604; 0,2181$ nm) ir C_2S ($d = 0,2790; 0,2783; 0,2745; 0,2645; 0,2610; 0,2189$ nm). Cemento akmenyje su skirtingais aktyviaisiais mineraliniais priedais aptikti šie pagrindiniai hidratacijos metu susidarę naujadarai: kalcio hidrosilikatai ($d = 0,3042; 0,2789; 0,1924$ nm), portlanditas ($d = 0,4901; 0,2629; 0,1928; 0,1796; 0,1687$ nm), etringitas ($d = 0,9782; 0,5629$ nm) ir kalcitas ($d = 0,3036; 0,2286; 0,2100; 0,1913; 0,1878$ nm).

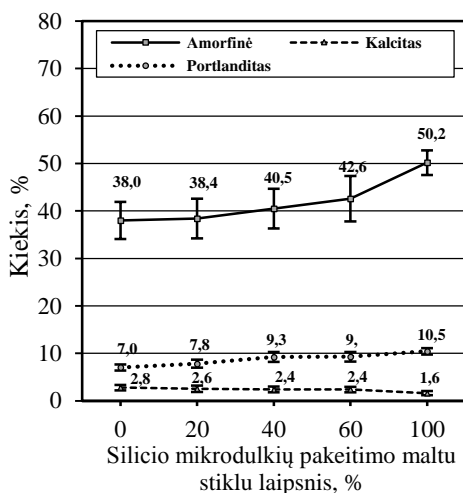
Įdomūs rezultatai pastebėti, kai naudotas pastovus kiekis silicio mikrodulkių ir kintamas kiekis malto stiklo (**3.3 lentelė bei 3.18 ir 3.19 paveikslai**). Keičiant kvarcinį smėlį pagal masę nuo 0 % iki 100 % malto stiklu, C_2S fazės sumažėjo nuo 34,2 % iki 24,8 %; C_3S fazės sumažėjo nuo 10,9 % iki 7,7 %; C_4AF fazės sumažėjo nuo 7,0 % iki 4,5 %; portlandito sumažėjo nuo 7,0 % iki 3,8 %; kalcito sumažėjo nuo 2,8 % iki 1,9 %; amorfinės fazės padidėjo nuo 38,0 % iki 56,4 %.

Pastebėta, jog, didėjant cemento akmenyje malto stiklo kiekiui, pagrindinių klinkerio mineralų ir portlandito fazių kiekiai proporcingai mažėjo, o amorfinės fazės kiekis proporcingai didėjo. Sumažėjęs klinkerio mineralų kiekis galėtų būti siejamas suintensyvėjusią cemento hidrataciją dėl susidariusios silicio rūgšties (H_2SiO_3) ir susidariusio skysto natrio silikato ($Na_2SiO_3 \cdot nH_2O$). Šie du junginiai veikia kaip hidratacijos greitikliai, suintensyvinantys cemento akmenyje vykstančius cheminius procesus. Sumažėjusi portlandito fazė leidžia daryti prielaidą, jog maltas stiklas turi pucolaninėms medžiagoms būdingų savybių ir suriša dalį portlandito, sudarydamas papildomą CSH naujadarų kiekį. Padidėjęs amorfinės fazės kiekis galėtų būti traktuojamas dvejopai: 1) siejamas su didesniu susidariusiu kalcio hidrosilikatų (CSH)

kiekiu; 2) tačiau esant šiai fazei taip gali būti priskirtas ir nesureagavęs maltas stiklas ar silicio mikrodulkės, todėl kai naudojamos kelios medžiagos, turinčios amorfinę struktūrą, susidaręs amorfinės fazės kiekis yra sunkiai interpretuojamas ir nėra geras rodiklis vertinant, jog susidarė didesnis kiekis CSH.

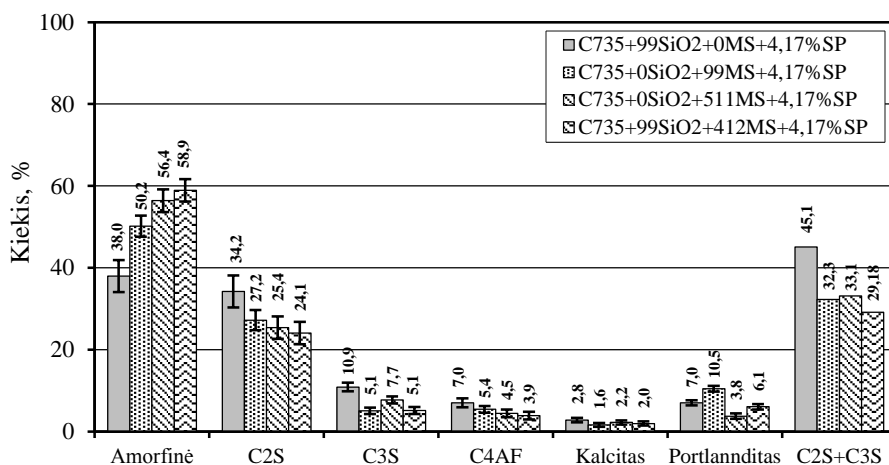


3.20 pav. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių kiekio įtaka nehidratuotiems klinterio mineralams ($V/C = 0,25$)



3.21 pav. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių kiekio įtaka hidratacijos produktams ($V/C = 0,25$)

Panašios tendencijos buvo pastebėtos, kai silicio mikrodulkės buvo keistos maltu stiklu (**3.4 lentelė** bei **3.20 ir 3.21 paveikslai**). Nustatyta, jog kai silicio mikrodulkių pakeitimo maltu stiklu laipsnis kito nuo 0 % iki 100 %, tai C_2S fazės sumažėjo nuo 34,8 % iki 27,2 %; C_3S fazės sumažėjo nuo 10,9 % iki 5,1 %; C_4AF fazės sumažėjo nuo 7,3 % iki 5,3 %; portlandito fazės padaugėjo nuo 7,0 % iki 10,5 %; kalcito fazės sumažėjo nuo 2,8 % iki 1,6 %, o amorfinės fazės padaugėjo nuo 38,0 % iki 50,2 %. Pastebėtas įdomus faktas, kai lyginamas silicio mikrodulkių ir malto stiklo aktyvumas. Pastebėta, jog tas pats kiekis malto stiklo sugeba padidinti iki 30 % hidratavusio klinterio mineralo kiekį nei silicio mikrodulkės. Taip pat pastebėta, jog, esant tam pačiam malto stiklo kiekiui, susidaro iki 30 % daugiau portlandito. Remiantis gautais rezultatais galima teigti, jog, naudojant maltą stiklą, cheminių reakcijų metu susidaręs skystas natrio silikatas ($Na_2SiO_3 \cdot nH_2O$) yra gerokai efektyvesnis hidratacijos greitiklis, nei silicio rūgštis (H_2SiO_3), kuri susidaro naudojant silicio mikrodulkes. Pastebėtas dar vienas svarbus faktas, jog, esant mažiems V/C santykiams ir kai yra pritaikytas terminis apdorojimas, malto stiklo aktyvumas tampa labai panašus į silicio mikrodulkių. Tačiau galutinės cemento akmenys savybės daugiausia priklausys nuo cemento sistemoje likusio portlandito kiekio – kuo liks daugiau nesureagavusio CH, tuo bus mažesnis cemento akmenis ir betono stiprumas. Efektyviausia klinterio mineralų hidratacija pastebėta mišinyje ($C735+99SiO_2+247MS+4,17\%SP$), kuriame buvo panaudota 247 kg/m^3 malto stiklo. Toliau didėjant malto stiklo kiekiui, klinterio mineralų hidratacija nėra intensyvi. Taip pat pastebėta, jog, naudojant daugiau nei 247 kg/m^3 malto stiklo, portlandito kiekis cemento akmenyje toliau mažėja. Todėl gaminant ypač stiprų betoną ir keičiant brangesnius užpildus maltu stiklu, nors ir nevyks intensyvesnis klinterio mineralų hidratacijos procesas, tačiau nesurišto portlandito sumažės (**3.22 paveikslas**).



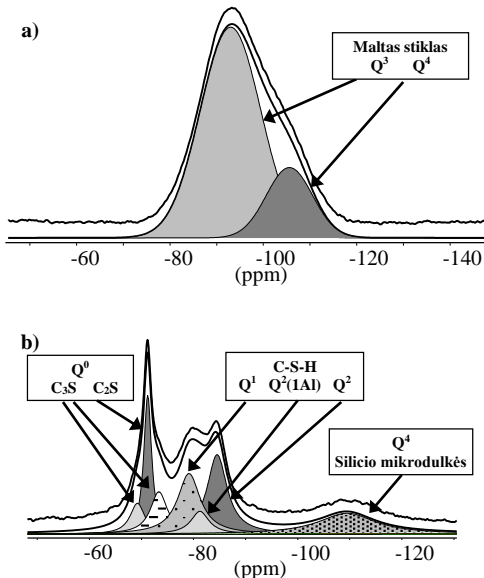
3.22 pav. Cemento akmens su skirtingu malto stiklo kiekiu rentgenografinės analizės rezultatai (V/C = 0,25)

Dar vienas įdomus faktas, jog sudėtyse, kuriose buvo panaudotas maltas stiklas, buvo aptikta šiek tiek mažiau kalcito. Šis faktas galėtų būti aiškinamas tuo, jog naudojant maltą stiklą gaunamas tankesnės struktūros cemento akmuo, kurio pralaidumas skysčiams ir dujoms taip pat sumažėja. Esant tankesnei cemento sistemai, atmosferoje esantis CO₂ sunkiau prasiskverbia pro cemento akmens struktūrą, todėl didžioji portlandito dalis karbonizuoja tik išorinėje dalyje. Ši prielaida bus patvirtinta vėlesniuose skyriuose nagrinėjant ypač stipraus betono poringumo parametrus.

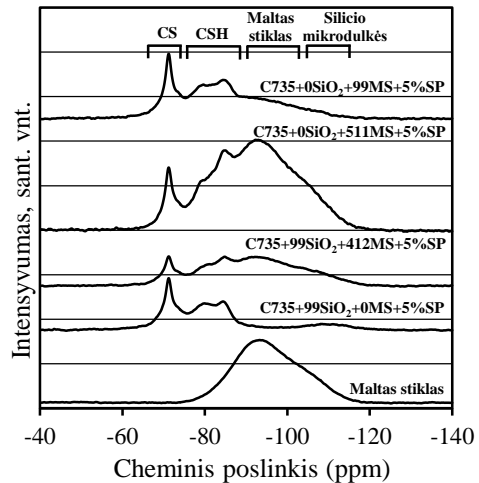
Taikant ²⁹Si MAS magnetinį branduolių rezonanso metodą, smailės šifruotos naudojant standartinę Qⁿ nomenklatūrą. Šiuo metodu buvo tirtos 4 reikšmingiausios cemento akmens sudėtyse (**3.3 ir 3.4 lentelės** bei **3.23 paveikslas**): C735+99SiO₂+0MS+4,17%SP – standartinis cemento akmuo su silicio mikrodulkėmis; C735+99SiO₂+412MS+4,17%SP – cemento akmuo, kuriame naudojamos silicio mikrodulkės ir 100 % kvarcinio smėlio pakeista maltu stiklu; C735+0SiO₂+511MS+4,17%SP – cemento akmuo, kuriame 100 % silicio mikrodulkių ir malto kvarcinio smėlio pakeista maltu stiklu; C735+0SiO₂+99MS+4,17%SP – cemento akmuo, kuriame 100 % silicio mikrodulkių pakeista maltu stiklu.

Atliekant cemento akmens spektrogramų analizę, sudėtyse, kuriose buvo panaudotas maltas stiklas, šifruojant pastebėtas labai aukštas signalų triukšmo lygis (**3.24 paveikslas**), todėl siekiant išvengti signalų persidengimų buvo atlikta gauto signalo dekonvoliucija (signalų išskaidymas į pirminius masyvus). Dekonvoliucija buvo atlikta nesureagavusiam maltam stiklui ir cemento akmeniui (C735+99SiO₂+ 0MS+4,17%SP), kuriame nepanaudotas maltas stiklas (**3.23 paveikslas**). Pastebėta, jog nesureagavusio malto stiklo signalas susideda iš dviejų kreivių, kuriose Q³ ir Q⁴ santykis yra 4 su 1 (**3.23 a paveikslas**). Atliekant cemento akmens su silicio mikrodulkėmis (C735+99SiO₂+0MS+4,17%SP sudėtis ir **3.23 b paveikslas**) signalo dekonvoliuciją, buvo pastebėti nesureagavę klinkerio mineralai C₃S ir C₂S (Q⁰), susiformavęs CSH (Q¹ ir Q²) ir nesureagavusios silicio mikrodulkės (Q⁴). Kitų sudėčių dekonvoliucija taip pat buvo atlikta panašiai. Apibendrintos spektrogramos pateiktos **3.24 paveiksle**. Silicio elemento cemento akmens su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu prieš ir po hidratacijos

proceso kiekis pateiktas **3.5 lentelėje**. Apskaičiuoti cemento, silicio mikrodulkių ir malto stiklo hidratacijos laipsniai pateikti **3.6 lentelėje**.



3.23 pav. Cemento akmens su skirtingu malto stiklo kiekiu ^{29}Si MAS magnetinio branduolių rezonanso spektro interpretacija, kai naudotas: a – maltas stiklas; b – cemento akmuo (C735+99SiO₂+0MS+4,17%SP) su silicio mikrodulkėmis



3.24 pav. Cemento akmens sus skirtingu malto stiklo kiekiu ^{29}Si MAS magnetinio branduolių rezonanso spektrograma (V/C = 0,25)

Kaip ir tikėtasi, ^{29}Si MAS branduolių magnetinio rezonanso metodas patvirtino ankstesnę prielaidą, jog maltas stiklas iš tiesų yra puikus hidratacijos greitiklis ir padidina klinkerio mineralų hidrataciją. Pastebėta, jog esant C735+99SiO₂+412MS+4,17%SP, kur 100 % malto kvarcinio smėlio buvo pakeista maltu stiklu, cemento hidratacijos laipsnis padidėjo 4 %, esant C735+0SiO₂+511MS+4,17%SP, kur 100 % silicio mikrodulkių ir malto kvarcinio smėlio buvo pakeista maltu stiklu, cemento hidratacijos laipsnis padidėjo 23 %, esant C735+0SiO₂+99MS+4,17%SP, kur 100 % silicio mikrodulkių buvo pakeista maltu stiklu, cemento hidratacijos laipsnis padidėjo 18 %, lyginant su standartine sudėtimi (C735+99SiO₂+0MS+4,17%SP), kai nebuvo malto stiklo. Remiantis gautais rezultatais galima teigti, jog tarp panaudoto malto stiklo kiekio ir padidėjusio cemento hidratacijos laipsnio nėra koreliacijos.

Taip pat nustatyta, jog, nepriklausomai nuo malto stiklo kiekio, visų nagrinėtų sudėčių vidutinis CSH grandinės ilgis buvo labai panašus (~5,0 sant. vienet). Pastebėtas įdomus faktas nagrinėjant ^{29}Si MAS magnetinio branduolių rezonanso spektrogramas. Kai buvo panaudotas maltas stiklas, smailės ties 82,22 ppm cheminiu poslinkiu (Q^2) buvo kur kas intensyvesnės. Šioje zonoje (Q^2) esanti smailė būdinga 1,1 nm tobermorito susiformavimui. ^{29}Si MAS magnetinis branduolių rezonanso metodas nepatvirtino ankstesnės prielaidos, jog maltas stiklas turėtų turėti panašų ar kiek mažesnę nei silicio mikrodulkių pucolaninį aktyvumą. Tyrimas parodė, jog maltas stiklas pucolaninėje reakcijoje nedalyvauja arba reaguoja labai nedaug. Šis faktas nėra visiškai teisingas ir

galėtų būti paaiškintas nagrinėjant signalų persidengimą dėl malto stiklo struktūros: prieš reakciją malto stiklo spektrograma yra labai panaši į silicio mikrodulkių spektrogramą, tačiau pasiskirsčiusi plačiau (tarp Q^3 ir Q^4) ir turi intensyvesnę smailę, malto stiklo struktūra yra kur kas panašesnė į cementą nei į silicio mikrodulkes, tačiau taip pat turi nemažą kiekį amorfinio SiO_2 .

3.5 lentelė. Silicio elemento kiekis cemento akmenyje su skirtingu aktyviojo mineralinio priedo kiekiu (reikšmės skliausteliuose nurodytos prieš hidratacijos procesą)

Sudėtis	Kiekis, mol-% Si			
	nehidratavęs cementas	nehidratavusios silicio mikrodulkės	nehidratavęs maltas stiklas	CSH
C735+99SiO ₂ +0MS+4,17%SP	33 (62)	14 (39)	–	53 (0)
C735+99SiO ₂ +412MS+4,17%SP	14 (29)	6 (18)	53 (53)	26 (0)
C735+0SiO ₂ +511MS+4,17%SP	9 (30)	–	66 (69)	25 (0)
C735+0SiO ₂ +99MS+4,17%SP	24 (69)	–	32 (32)	45 (0)

Vykstant cemento hidratacijos procesui, dėl cemento ir malto stiklo cheminių sudėčių panašumų taip pat turėtų susidaryti panašūs junginiai. Šifruojant spektrogramas sudėtyse su maltu stiklu, aptiktas labai aukštas triukšmo lygis, todėl cemento akmenyje, kuriame panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas, yra gana sunku nustatyti tikrąjį likusį nesureagavusio stiklo kiekį (kreivės persidengia). Esminis trūkumas, taikant ^{29}Si MAS magnetinį branduolių metodą, jog tiriamas tik silicio polimerizacijos laipsnis, nors silicio elementas aptinkamas dviejuose pagrindiniuose klinkerio mineraluose (C_3S ir C_2S), nuo kurių ir priklauso daugelis cemento akmens savybių, tačiau taip pat nemažai cemento akmens savybių priklauso ir nuo kitų klinkerio mineralų (C_3A ir C_4AF). Tačiau kaip, taikant šį metodą, keičiasi kiti elementai, atsakyti negalima. Galbūt pritaikius ^{27}Al MAS ar kitų elementų branduolių magnetinio rezonanso metodus, būtų galima rasti daugiau atsakymų, tačiau eksperimentinių tyrimo metu nagrinėjant cemento akmens struktūrą kitų elementų polimerizacijos laipsnis nebuvo nagrinėtas.

3.6 lentelė. Cemento, silicio mikrodulkių ir malto stiklo hidratacijos laipsnis ir vidutinis C-S-H grandinės ilgis

Sudėtis	Hidratacijos laipsnis, mol-% Si			Vidutinis C-S-H grandinės ilgis (sant. vienetai)
	Cementas	Silicio mikrodulkės	Maltas stiklas	
C735+99SiO ₂ +0MS+4,17%SP	47	64	–	4,6
C735+99SiO ₂ +412MS+4,17%SP	51	66	0	4,4
C735+0SiO ₂ +511MS+4,17%SP	70	–	5	5,2
C735+0SiO ₂ +99MS+4,17%SP	65	–	0	4,6

3.2.4. Malto stiklo ir silicio mikrodulkių įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui

Eksperimentiškai ištirta, kaip silicio mikrodulkės ir maltas stiklas paveiks cemento akmens struktūrą. Nustatyta, jog maltas stiklas, turėdamas palyginti didelį amorfinės struktūros SiO_2 (>70%) ir palyginti didelį Na_2O ir K_2O kiekį, gali veikti kaip pucolaninis priedas ir klinkerio mineralų hidratacijos greitiklis. Pastebėta, jei cemento akmuo, kuriame panaudotas maltas stiklas, nėra termiškai apdorotas, tai maltas stiklas kaip

pucolaninis priedas ir hidratacijos greitiklis nėra labai efektyvus. Malto stiklo efektyvumas padidėja, kai cemento akmuo termiškai apdorojamas. Pradinėje hidratacijos stadijoje maltas stiklas dalyvauja kaip inertinis hidrofobinis mikroužpildas. Tai labai patogu, kai su šiuo mikroužpildu maišoma cemento tešla arba kai jis yra ilgesnį laiką sandėliuojamas. Vykstant cemento akmens hidratacijos procesui, kai susidaręs tirpalas pasiekia gana aukštą šarminę terpę ($\text{pH} \geq 12,8$), maltas stiklas ir silicio mikrodulkės pradeda tirpti. Tirpdamos silicio mikrodulkės sudaro silpną silicio rūgštį (H_2SiO_3), kuri suintensyvina klinkerio mineralų tirpumą. Tirpdamas maltas stiklas ne tik sudaro silpną silicio rūgštį (H_2SiO_3), tačiau sudaro ir skystą natrio silikatą ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Susidariusio natrio silikato modulis nėra žinomas, tačiau priklauso nuo $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ santykio, kuris daugiausia priklauso nuo panaudotų aktyviųjų mineralinių priedų ir ištirpusių šarmų kiekio, o susidariusio natrio silikato koncentracija – nuo V/C santykio. Natrio silikatas pramonėje yra žinomas kitu pavadinimu – skystasis stiklas. Skystasis natrio silikatas yra šiek tiek efektyvesnis hidratacijos greitiklis už silicio rūgštį, todėl klinkerio mineralų hidratacijos procesas smarkiai suintensyvėja. Tolesnis cemento akmens hidratacijos procesas priklausys nuo susidariusio natrio silikato kiekio ir natrio silikato modulio – kuo šie rodikliai didesni, tuo hidratacijos procesas bus intensyvesnis. Efektyviausias malto stiklo kiekis hidratacijos procesui yra iki 247 kg/m^3 , toliau didėjant malto stiklo kiekiui, klinkerio mineralų hidratacija praktiškai nekinta ir daugiausia priklausys nuo tolesnių laikymo sąlygų. Susidaręs natrio silikatas yra šarminės korozijos produktas, todėl kuo daugiau bus susidarę šio junginio, tuo bus didesnis tirpale esančių Na^+ ir K^+ jonų kiekis. Gaminant ypač stiprų betoną turi būti išlaikyti tam tikri užpildų reikalavimai. Reikėtų vengti smėlinių užpildų, kuriuose vyrauja stambių dalelių reaktyviųjų uolienu (opalas, chalcedonas, silicio smiltainis, titnagas ir kt.). Paprastai ypač stipriuose betonuose naudojamas įvairios frakcijos kvarcinis smėlis, todėl žalinga šarminės korozijos destrukcija nėra pavojinga. Tačiau norint naudoti kitų tipų smėlį reiktų patikrinti, ar užpilduose nėra reaktyviųjų uolienu arba smėlį sumalti (ar prasijoti), kad užpilde neliktų stambesnių nei $0,25 \text{ mm}$ dydžio dalelių. Tolygiai pasiskirstęs cemento sistemoje natrio silikatas gali reaguoti su portlanditu (CH) ir sudaryti antrinės hidratacijos naujadarą CSH(I), kuriame bus įsiterpę šarminių metalų (Na^+ ir K^+) jonų. Nors eksperimentiniais tyrimais to nebuvo įrodyta (tai bus atlikta vėlesniame skyriuje), tačiau sureagavęs didesnis kiekis klinkerio mineralų gerokai sumažins cemento akmens poringumą, dėl to pagerės ne tik mechaninės, bet ir fizikinės savybės. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, jog naudojant maltą stiklą cemento akmens mikrostruktūra ne tik nesuprastėja, bet kur kas pagerėja, todėl maltas stiklas gali puikiai pakeisti silicio mikrodulkes ir išspręsti cemento poreikvojimo problemą.

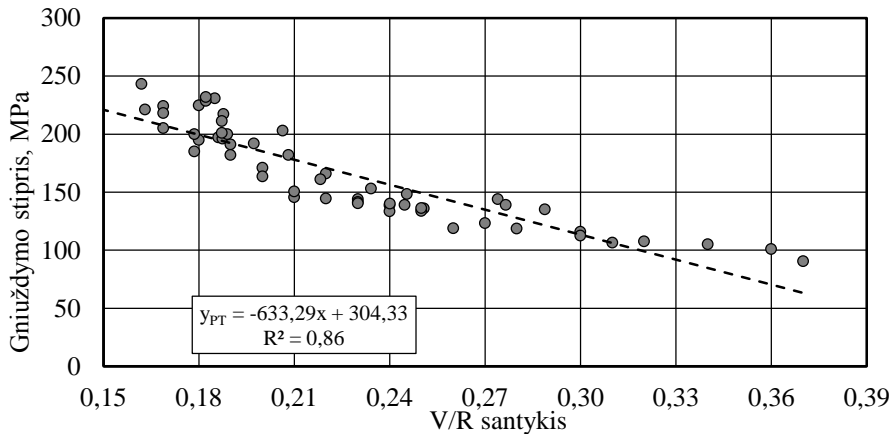
3.3. Ypač stipraus betono struktūros sudarymo principai

Betono mišinio sudėtis buvo parinkta sudarant optimalų dalelių pagal dydį pasiskirstymą, taikant Funk (1994) metodą. Magistrantūros baigiamajame darbe „Ypač stipraus betono tyrimai“ buvo pateiktos dvi matematinės išraiškos (Šerelis, 2011), pagal kurias buvo galima apskaičiuoti po 28 parų natūraliomis sąlygomis (NS) ir termiškai kietintų (TK) bandinių gniuždymo stiprius (**3.2 ir 3.3 formulės**). Tačiau lygtys galiojo, kai buvo naudojamos vietinės žaliavos, o V/R santykis kito nuo 0,17 iki 0,27.

$$f_{28}(\text{NS}) = 17 \cdot R_c \cdot \left(0,38 - \frac{V}{R} \right) \quad (3.2)$$

$$f_{28}(TK) = 17 \cdot R_c \cdot \left(0,40 - \frac{V}{R}\right) \quad (3.3)$$

Atlikus išsamesnius tyrimus buvo patikslinti tyrimų rezultatai, įvertinant įvairesnes vietines ir atvežtines žaliavas, patikslinant V/R santykio skaičiavimo metodiką bei įvairias technologines priemonės, kurios detalčiau bus panagrinėtos vėlesniuose skyriuose. Betono mišinio sudėties projektavime buvo taikytas Schwanda (1966) matematinis modelis, pagal kurį buvo siekiama padidinti santykinį mišinio tankį.



3.25 pav. V/R santykio įtaka gniuždymo stipriui

Išsamesni modelio skaičiavimų rezultatai bus pateikti vėlesniuose skyriuose, aproksimuotos matematinės išraiškos, pagal kurias buvo atliktas betono mišinio sudėties projektavimas, pateiktas **3.25 paveiksle**. Priklausomybės tarp V/R santykio ir gniuždymo stiprio sudarytos nagrinėjant daugiau kaip 70 skirtingų YSB sudėčių. Gniuždymo stipris nustatytas iš 6 cilindro formos ($d = 50$ mm ir $h = 50$ mm) bandinių ir **3.25 paveiksle** pateiktas kaip vidutinė vertė. Priklausomybės galioja tol, kol išlaikyti šių medžiagų kiekiai: cemento kiekis – 735 ± 50 kg/m³ (cemento klasė 52,5 R), silicio mikrodulkių kiekis – 99 ± 50 kg/m³, malto stiklo kiekis – nuo 0 iki 512 kg/m³, bei naudojant polikarboksilato eterio pagrindu sukurtą plastiklį. Siekiant patikrinti matematinius skaičiavimus, tikslinga atlikti papildomus eksperimentinius tyrimus ir patikrinti matematinės išraiškas.

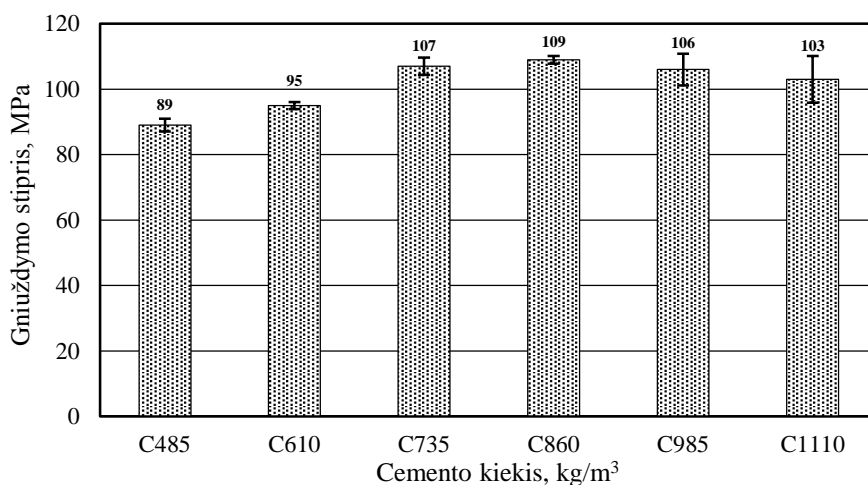
3.3.1. Cemento kiekio parinkimas

Atliekant eksperimentinius tyrimus buvo siekiama nustatyti racionalų cemento kiekį ypač stipraus betono mišinyje. Tam buvo suformuoti betono mišiniai (**3.7 lentelė**). Tyrimo metu maltas kvarcinis smėlis keistas cementu, cemento kiekis sudėtyse parinktas pagal išnagrinėtą literatūros analizę ir kito nuo 485 kg/m³ iki 1110 kg/m³ (kitimo intervalas 125 kg/m³). Minimalus V/C santykis, kuriam esant pavyko sumaišyti mišinį, buvo 0,57. V/C santykis tyrimo metu buvo išlaikytas pastovus.

3.7 lentelė. Preliminarios ypač stipraus betono mišinio sudėtys

Sudėties Nr.	V/C	Vanduo, kg/m ³	Cementas ^[1] , kg/m ³	Maltas kvarcinis smėlis ^[2] , kg/m ³	Kvarcinis smėlis ^[3] #0/1.6 mm, kg/m ³
C485	0,57	276,5	485	662	962
C610		347,7	610	537	
C735		419	735	412	
C860		490,2	860	287	
C985		561,5	985	162	
C1110		632,7	1110	37	

Pastaba: ¹AB „Akmenės cementas“, ^{2,3} AB „Anykščių kvarcinis smėlis“.



3.26 pav. Cemento kiekio įtaka gniuždymo stipriui (V/C=0,57)

Nagrinėtų sudėčių betonuose (**3.26 paveikslas**) didesnis nei 100 MPa gniuždymo stipris pasiektas tik kai cemento kiekis mišinyje buvo didesnis nei 735 kg/m³. Toliau didėjant cemento kiekiui, gniuždymo stipris praktiškai nekito ir išliko pastovus (~106 MPa), todėl pagal gautus rezultatus galima teigti, jog naudoti didesnę nei 735 kg/m³ cemento kiekį nėra ekonomiškai racionalu. Didėjant cemento kiekiui ir išlaikant pastovų V/C santykį, proporcingai mišinio tūryje taip pat didėja vandens kiekis; didėjant vandens kiekiui nors ir sureaguos santykinai didesnis cemento kiekis, tačiau taip pat susidarys didesnis kapiliarinių ir uždarytųjų porų kiekis, dėl kurių betono gniuždymo stipris pradės mažėti. Tolesni eksperimentiniai tyrimai atlikti naudojant 735 kg/m³ cemento kiekį.

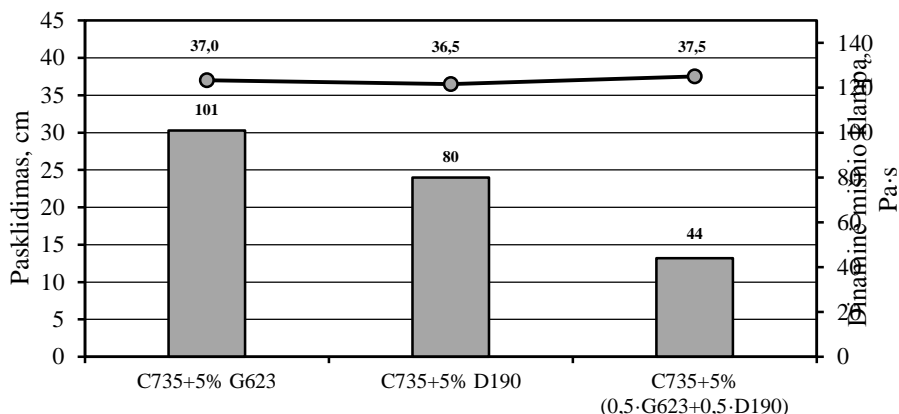
3.3.2. Superplastiklio kiekio parinkimas

Tyrimo metu buvo pasirinkti dviejų skirtingų gamintojų efektyviausi superplastikliai: „Glenium SKY 623“ (UAB BASF) ir „Sika VISCOCRETE D190“ (UAB „Sika AG“). Buvo siekiama įvertinti, kuris iš šių superplastiklių yra tinkamesnis ir efektyvesnis ruošiant ypač stipraus betono mišinį ir kokios įtakos šie cheminiai priedai turi cemento kietėjimo procesui. Ypač stipraus betono mišiniuose, skirtingai nei įprastinėse sudėties betono mišiniuose, yra naudojamas kur kas didesnis superplastiklio kiekis. Pagal atliktą literatūros analizę pastebėta, jog superplastiklio kiekis gali siekti iki 10 % (cemento masės). Dėl didelio kiekio šio cheminio priedo gali kur kas sulėtėti cemento hidratacijos

procesas, tačiau toks superplastiklio kiekis yra būtinas, norint sumaišyti ypač stipraus betono mišinį.

3.8 lentelė. Ypač stipraus betono mišinio sudėtys

Komponentas	Superplastiklio kiekis, %			
	0,0	1,6	3,3	5,0
V/C	0,4	0,4	0,4	0,4
Vanduo, kg/m ³	294	294	294	294
Cementas, kg/m ³	735	735	735	735
Maltas kvarcinis smėlis, kg/m ³	412	412	412	412
Kvarcinis smėlis #0/1.6 mm, kg/m ³	962	962	962	962
Superplastiklis (SP), kg/m ³	0,00	11,76	24,26	36,76



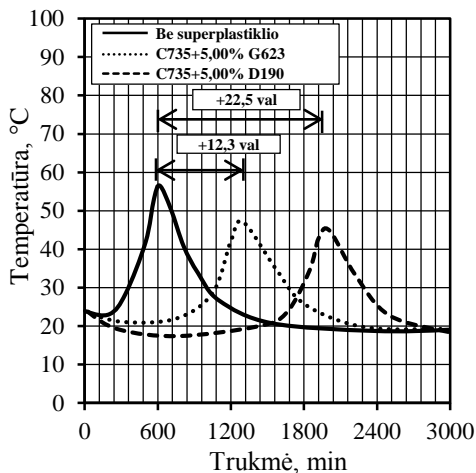
3.27 pav. Dinaminės mišinio klampos ir mišinio pasklidimo įtaka superplastiklio tipui

Nagrinėjant skirtingų gamintojų superplastiklius buvo pastebėtas įdomus faktas (**3.27 paveikslas**). Panaudojus tą patį kiekį skirtingų gamintojų superplastiklio, mišinio pasklidimas nagrinėtose sudėtyse buvo labai panašus (~37 cm), tačiau dinaminė mišinio klampa labai kito. Naudojant „Sika VISCOCRETE D190“ superplastiklį dinaminė mišinio klampa buvo (apie 20 %) mažesnė, lyginant su „Glenium SKY 623“.

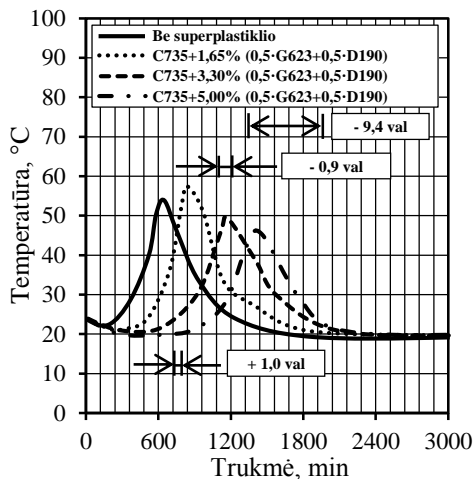
Vertinant superplastiklio kiekio įtaką cemento tešlos rišimosi procesams pastebėta, jog cemento tešlos be superplastiklio kietėjimo pradžia prasideda po ~130 min (nuo mišinio užmaišymo), o rišimosi pabaiga yra po 622 min (**3.9 lentelė** ir **3.28 paveikslas**). Panaudojus 5 % (cemento masės) „Glenium Sky 623“ superplastiklio, cemento tešlos kietėjimo pradžia prasideda po 478 min, o kietėjimo pabaiga – po 1358 min. Panaudojant 5 % (cemento masės) „Sika Viscocrete D190“ superplastiklio, kietėjimo pradžia prasideda po 866 min, o kietėjimo pabaiga – po 1973 min. Iš eksperimento tyrimų rezultatų matyti, jog abiejų gamintojų superplastikliai gerokai sulėtina cemento tešlos rišimosi procesą, tačiau sulėtinimo efektas nėra vienodas.

Cemento tešlos be superplastiklio kietėjimas baigiasi maždaug po 10 valandų, cemento tešlos su 5% „Glenium Sky 623“ superplastikliu kietėjimas pailgėja 12 valandų, o panaudojant 5 % superplastiklio „Sika Viscocrete D190“ kietėjimo pabaiga pailgėja 22 valandomis ilgiau, lyginant su cemento tešla, kurioje superplastiklio nepanaudota. Abiejų superplastiklių įtaka reakcijos intensyvumui yra labai panaši, tačiau kietėjimo pradžios ir

pabaigos laikas gerokai skiriasi. Siekiant efektyviau įvertinti superplastiklius, tikslinga detaliau panagrinėti šių cheminių priedų poveikį cemento tešlos kietėjimo procesui.



3.28 pav. Superplastiklių (G623 ir D190) įtaka cemento tešlos rišimosi procesui



3.29 pav. Modifikuoto superplastiklio įtaka cemento tešlos rišimosi procesui

3.9 lentelė. Superplastiklių įtaka cemento tešlos kietėjimo procesui

Sudėtis	Rišimosi radžia, min	Rišimosi pabaiga, min	Pradinė temperatūra, °C	Minimali temperatūra, °C	Maksimali temperatūra, °C	Plotas, sant. vnt.
C735	130	622	23,04	21,92	55,23	7,39
Cementas+5,00% D190	866	1973	23,04	16,8	44,92	6,88
Cementas+5,00% G623	478	1358	23,04	18,96	45,08	7,04
C735	128	622	23,06	21,93	55,22	7,39
C735+1,65% D190	298	796	23,06	20,31	59,38	7,46
C735+3,30% D190	549	1232	23,06	18,32	51,18	7,23
C735+5,00% D190	866	1973	23,06	16,8	44,92	6,87
C735	130	630	23,23	22,37	56,43	7,38
C735+1,65% G623	283	826	23,23	20,93	55,54	7,4
C735+3,30% G623	410	1159	23,23	19,96	50,66	7,38
C735+5,00% G623	478	1358	23,23	18,96	45,08	7,01
C735	135	630	23,34	22,22	53,27	7,45
C735+1,65% SP(0,5·G623+0,5·D190)	278	855	23,34	20,86	57,04	7,67
C735+3,30% SP(0,5·G623+0,5·D190)	441	1176	23,34	19,69	48,01	7,39
C735+5,00% SP(0,5·G623+0,5·D190)	499	1412	23,34	18,76	44,46	7,12

Vertinant „Sika Viscocrete D190“ superplastiklio kiekio įtaką cemento tešlos kietėjimo procesui pastebėta, jog, nepriklausomai nuo superplastiklio kiekio, kietėjimo procesas, esant visoms nagrinėtoms sudėtims, prailgėjo. Intensyviausias kietėjimo procesas pastebėtas naudojant 1,65 % (cemento masės) „Sika Viscocrete D190“ superplastiklio, šiuo atveju kietėjimo metu registruotos temperatūros smailė pakilo apie

7 % nuo 55,23 °C (be superplastiklio) iki 59,38 °C (su 1,65 % superplastiklio). Toliau didėjant superplastiklio kiekiui, reakcijos intensyvumas proporcingai mažėjo, o kietėjimo procesas proporcingai ilgėjo.

Naudojant didesnę kiekį superplastiklio nustatyta, jog kietėjant temperatūra padidėjo, pagal šią tendenciją būtų galima teigti, kad sureagavusio cemento kiekis taip pat turėtų proporcingai mažėti. Laikantis prielaidos, jog po temperatūrine kreive išbrėžtas plotas lygus hidratacijos metu išskirtam šilumos kiekiui, kuris yra tiesiogiai proporcingas sureagavusio cemento kiekiui, ir apskaičiavus šiuos plotus (**3.9 lentelė**) pastebimas įdomus faktas: didėjant superplastiklio kiekiui, maksimali kietėjimo metu pasiekta temperatūra proporcingai mažėja. Išbrėžtas plotas, didėjant superplastiklio kiekiui, proporcingai sumažėjo apie 7 %: nuo 7,39 sant. ploto vnt. (be plastiklio) iki 6,88 sant. ploto vnt. (su 5 % „Sika Viscocrete D190“) ir visose sudėtyse yra panašus.

Didėjant superplastiklio kiekiui, cemento hidratacijos procesas taip pat proporcingai intensyvėja. Pagal gautus rezultatus galima teigti, jog didesnis superplastiklio kiekis daugiausia įtakos turės kietėjimo kinetikai, tačiau galutinis rezultatas nekis arba bus labai nedidelis. Panašios tendencijos pastebėtos naudojant ir „Glenium Sky 623“ superplastiklį. Esminis skirtumas, jog naudojant superplastiklį „Glenium Sky 623“ kietėjimo pabaiga pasiekama apie 10 valandų anksčiau.

Siekiant išgauti efektyvesnę plastifikavimo efektą ir sumažinti kietėjimo trukmę, nagrinėti superplastikliai buvo sumaišyti (santykiu 1:1 pagal masę). Atlikus šį modifikavimą buvo pastebėtas įdomus reiškinys (**3.29 paveikslas**): modifikuotas superplastiklis mišinio pasklidimui įtakos neturėjo, tačiau dinaminė mišinio klampa sumažėjo apie du kartus: nuo 101 Pa·s (naudojant „Glenium Sky 623“ superplastiklį) iki 44 Pa·s (naudojant 5% modifikuoto superplastiklio). Taip pat pastebėta, jog naudojant modifikuotą superplastiklį kietėjimo trukmė buvo labai panaši kaip ir naudojant „Glenium Sky 623“ superplastiklį (**3.29 paveikslas**). Tolesni eksperimentai buvo atliekami naudojant modifikuotą superplastiklį (SP).

3.3.3. Silicio mikrodulkių kiekio parinkimas

Atliekant eksperimentinį tyrimą buvo siekiama nustatyti racionalų silicio mikrodulkių kiekį ypač stipraus betono mišinyje. Tam buvo suformuotos preliminaros betono mišinio sudėtys (**3.10 lentelė**), kuriose silicio mikrodulkių kiekis kito nuo 0 % iki 20 % (pagal cemento masę), kitimo intervalas 5 %, nagrinėtose betono mišinio sudėtyse buvo išlaikytas pastovus vandens ir rišiklio santykis $V/R = 0,30$. Gniuždymo stipris nustatytas iš 6 cilindro ($d = 50$ mm ir $h = 50$ mm) formos bandinių.

Didėjant silicio mikrodulkių kiekiui nuo 0 % iki 20 % (pagal masę), visose nagrinėtose sudėtyse mišinio pasklidimas išliko panašus $\sim 37,5 \pm 0,5$ cm, tačiau dinaminė mišinio klampa proporcingai mažėjo (**3.30 paveikslas**). Kintant silicio mikrodulkių kiekiui nuo 0 % iki 15 %, dinaminė mišinio klampa sumažėjo daugiau nei perpus – nuo 44 Pa·s (be silicio mikrodulkių) iki 20 Pa·s (su 15 % silicio mikrodulkių). Toliau didėjant silicio mikrodulkių kiekiui, dinaminė mišinio klampa pradėjo didėti. Sumažėjusi mišinio klampa gali būti paaiškinta keliomis priežastimis: daugiausia įtakos greičiausiai turėjo mišinyje esantis padidėjęs vandens kiekis, nes buvo siekiama išlaikyti pastovų V/R santykį, tačiau greičiausiai taip pat nemažai įtakos turėjo ir tai, jog kai buvo panaudota 15 % (nuo cemento masės) silicio mikrodulkių, buvo išgauta tankesnė mišinio granulimetrinė sudėtis.

3.10 lentelė. Ypač stipraus betono mišinio sudėtys

Komponentas	Silicio mikrodulkių kiekis, %			
	0	10	15	20
V/C	0,3	0,35	0,37	0,4
V/R	0,3	0,3	0,3	0,3
Vanduo, kg/m ³	221	256	273	291
Cementas, kg/m ³	735	735	735	735
Silicio mikrodulkės, kg/m ³	0	74	110	147
Maltas kvarcinis smėlis, kg/m ³	412	412	412	412
Kvarcinis smėlis #0/1.6 mm, kg/m ³	962	962	962	962
Superplastiklis (SP), kg/m ³	36,76	36,76	36,76	36,76

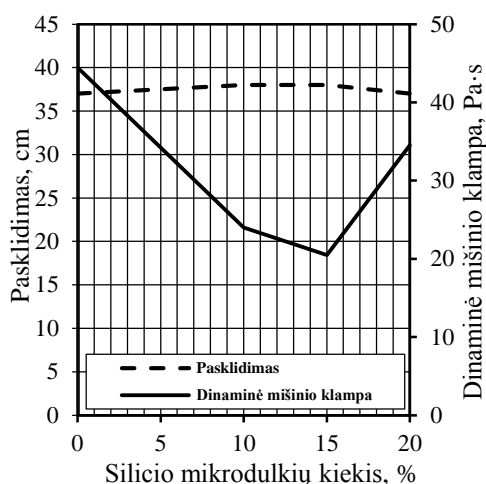
Nagrinėjant silicio mikrodulkių įtaką cemento akmens kietėjimo procesams buvo pastebėta įdomi tendencija: didėjant silicio mikrodulkių kiekiui nuo 0 % iki 20 %, kietėjant temperatūra padidėjo apie 1,5 karto: nuo 31,44 °C (be silicio mikrodulkių) iki 46,86 °C (su 20 % silicio mikrodulkių), o kietėjimo trukmė sutrumpėjo (**3.31 paveikslas**). Išbrėžtas plotas po kreivėmis, nepriklausomai nuo nagrinėtos betono mišinio sudėties, yra gana panašus (~7,00 sant. vnt.), todėl ankstyvasis stipris (1–3 paros) taip pat turėtų būti labai panašus, tačiau vėlyvasis stipris (≥7 paros) daugiausia priklausys nuo vykstančios pucolaninės reakcijos.

3.11 lentelė. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka cementinės tešlos kietėjimo procesui

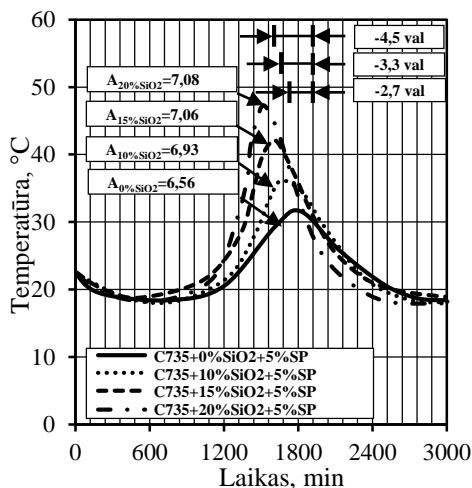
Sudėtis	Kietėjimo pradžia, min	Kietėjimo pabaiga, min	Pradinė temperatūra, °C	Minimali temperatūra, °C	Maksimali temperatūra, °C	Plotas, sant. vnt.
C735+0%SiO ₂ +5%SP	548	1825	21,08	17,9	31,44	6,56
C735+10%SiO ₂ +5%SP	505	1664	21,08	18,41	36,67	6,93
C735+15%SiO ₂ +5%SP	504	1626	21,08	18,39	40,84	7,06
C735+20%SiO ₂ +5%SP	502	1554	21,08	18,19	46,86	7,08

Pagal gautus tyrimo rezultatus galima teigti, jog didėjant silicio mikrodulkių kiekiui, cemento tešlos kietėjimo procesai spartėja, o kietėjimo trukmė intensyvėja. Šį efektą galima paaiškinti dviem priežastimis: 1) tirpstančios silicio mikrodulkės sudaro silpną silicio rūgštį (H₄SiO₄), kuri suintensyvina klinkerio mineralų hidratacijos procesą; didesnis šio aktyviojo mineralinio priedo kiekis sudaro didesnę silicio rūgšties kiekį, todėl hidratacijos procesas suintensyvėja; 2) kadangi silicio mikrodulkių dalelės gali būti iki 100 karto mažesnės už cemento daleles, tai cemento hidratacijos metu silicio mikrodulkių dalelės sudaro atskiras sritis, hidratacijos užuomazgas, ant kurių lengviau gali formuotis hidratacijos naujadarai, todėl šis panaudotas aktyvusis mineralinis priedas veikia kaip silpnas hidratacijos greitiklis.

Taikant kokybinę ir kiekybinę rentgenografinę analizę buvo siekta įvertinti, kaip cemento hidratacijos metu susiformavę naujadarai priklausys nuo silicio mikrodulkių kiekio ir nuo terminio apdorojimo. Eksperimentinio tyrimo metu buvo pasirinkti trys skirtingi terminiai režimai (**3.12 lentelė**). ZnO buvo naudojama kaip papildoma medžiaga kiekybinei analizei atlikti. Rezultatai pateikti **3.31–3.34 paveiksluose** ir **3.14 lentelėje**.



3.30 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka mišinio pasklidimui ir dinaminei klampai ($V/R = 0,30$)



3.31 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka cemento tešlos rišimosi procesui ($V/R = 0,30$)

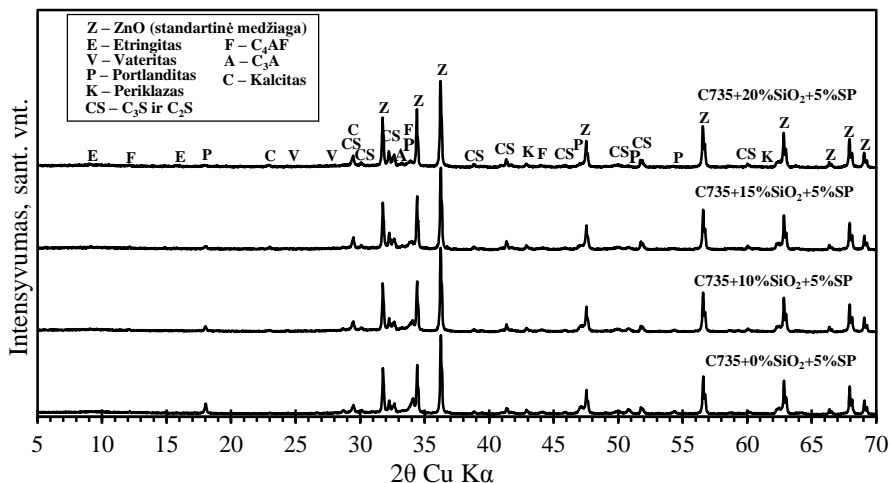
Rentgenogramoje (**3.32 paveikslas**) identifikuoti pagrindiniai klinkerio mineralai ir hidratacijos produktai, turintys kristalinę struktūrą. Pagrindinių nesureagavusio klinkerio mineralų būdingi atstumai tarp atominių plokštumų: nehidratuoto C_3S ($d = 0,3036; 0,2773; 0,2748; 0,2604; 0,2181$ nm) ir C_2S ($d = 0,2790; 0,2783; 0,2745; 0,2645; 0,2610; 0,2189$ nm). Cemento akmenyje su skirtingais aktyviaisiais mineraliniais priedais aptikti šie pagrindiniai hidratacijos metu susidarę naujadarai: kalcio hidrosilikatai ($d = 0,3042; 0,2789; 0,1924$ nm), portlanditas ($d = 0,4901; 0,2629; 0,1928; 0,1796; 0,1687$ nm), etringitas ($d = 0,9782; 0,5629$ nm) ir kalcitas ($d = 0,3036; 0,2286; 0,2100; 0,1913; 0,1878$ nm). Pastebėta, jog didėjant silicio mikrodulkių kiekiui, pagrindinių klinkerio mineralų (C_3S ir C_2S) ir portlanditui būdingų smalių intensyvumas proporcingai mažėjo, o tai leidžia daryti prielaidą, jog stiklo dulkės padidina klinkerio mineralų hidrataciją bei dalyvauja reakcijose kaip pucolaninis priedas.

3.12 lentelė. Eksperimentinių tyrimu metu taikyti kietinimo režimai

Žymuo	Aprašymas
T20	Nebuvo taikytas terminis apdorojimas, po išformavimo bandiniai buvo laikomi 27 paras 20 °C vandenyje
7D-T80	Po išformavimo bandiniai buvo laikomi 7 paras 20 °C vandenyje, tuomet buvo pritaikytas terminis apdorojimas 80 °C (3+16+5), o likusį laiką bandiniai kietinti 20 °C vandenyje
T80	Po išformavimo bandiniams buvo pritaikytas terminis apdorojimas 80 °C (3+16+5), o likusį laiką bandiniai kietinti 20 °C vandenyje

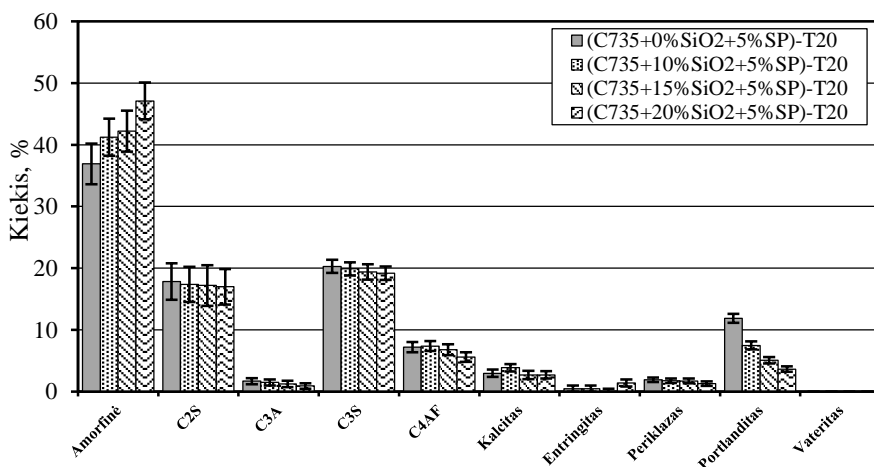
Siekiant patvirtinti anksčiau minėtą prielaidą, buvo atlikta kiekybinė rentgenografinė analizė (**3.33 paveikslas** ir **3.14 lentelė**). Pagal gautus rezultatus galima teigti, jog, nepriklausomai nuo panaudoto terminio apdorojimo, didėjant silicio mikrodulkių kiekiui, klinkerio mineralų kiekis ir susidariusio portlandito kiekis proporcingai mažėjo, o susidariusios amorfinės fazės proporcingai didėjo. Prie amorfinės fazės galėtų būti priskirtos nesureagavusios silicio mikrodulkės ir padidėjęs kalcio hidrosilikatų (C-S-H) kiekis, tačiau koks tikslus kiekis sureagavo silicio mikrodulkių ar kiek susidarė C-S-H, šis tyrimas atsakyti negali, į šiuos klausimus bus atsakyta vėlesniuose disertacijos

etapuose. Šie rezultatai patvirtina jau minėtą prielaidą, jog silicio mikrodukės cemento sistemose dalyvauja ne tik kaip pucolaninis priedas, bet ir kaip hidratacijos greitiklis.

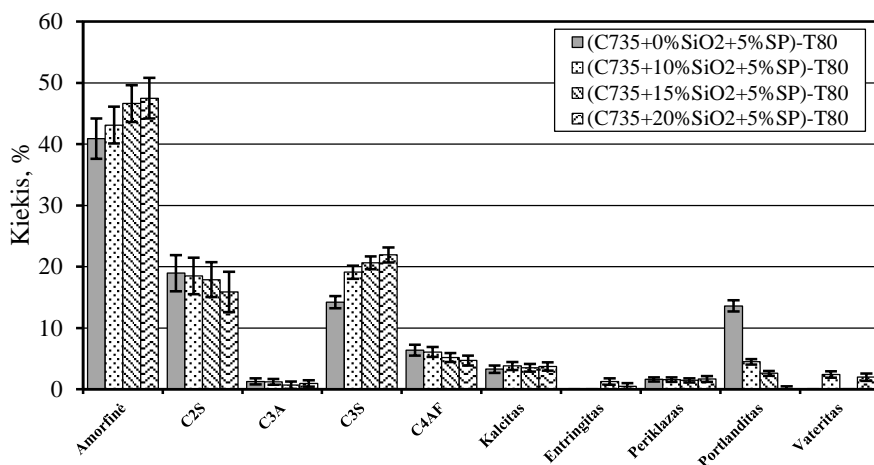


3.32 pav. Cemento akmenis su skirtingu silicio mikroduklių kiekiu rentgenograma

Taikant įvairius kietinimo režimus (**3.14 lentelė**) buvo aptiktas įdomus faktas: panaudojus 20 % (cemento masės) silicio mikroduklių cemento akmenyje pastebėta, jog dalyje nagrinėtų sudėčių praktiškai nebeliko portlandito. Dėl kokių priežasčių cemento akmenyje nebeliko portlandito, sunku įvertinti: ar dėl pucolaninės reakcijos, ar dėl karbonizavimosi proceso (greičiausiai dėl šių abiejų veiksnių). Gauti rezultatai galėtų būti traktuojami dvejopai: struktūriniu požiūriu sumažėjęs portlandito kiekis yra teigiamas, nes portlanditas yra linkęs kauptis aplink stambius užpildus ir mažinti cemento akmenis stiprumą bei stiprumą tarp cemento akmenis ir užpildo. Taip pat šie rezultatai leidžia daryti prielaidą, jog cemento akmenyje dėl pucolaninės reakcijos bus susidaręs kur kas didesnis kiekis C-S-H, o tai turės teigiamą įtaką gniuždymo stipriui.



3.33 pav. Cemento akmenis su skirtingu silicio mikroduklių kiekiu hidratatai, kai bandiniai nebuvo termiškai apdoroti



3.34 pav. Cemento akmens su skirtingu silicio mikrodulkių kiekiu hidratai, kai bandiniai buvo termiškai apdoroti esant 80 °C (3+18+5 h)

Tačiau vertinant ilgalaikiškumo požiūriu galima teigti, jog kai cemento akmenyje nebelieka portlandito arba nepakankamas jo kiekis, labai sumažėja betono šarminės terpės pH. Sumažėjęs šarminės terpės pH yra labai neigiamas faktorius, ypač tuomet, kai betone yra naudojama plieninė armatūra ar plieninis pluoštas. Dėl nepakankamo šarmingumo aplink armatūrą gali nesusidaryti apsauginis pasyvus sluoksnis, dėl šių priežasčių bus palankesnės sąlygos vystytis armatūros korozijai. Koroduojanti armatūra pradės plėstis ir ardyti betono struktūrą iš vidaus. Šiame skyriuje ilgalaikiškumo klausimai nenagrinėjami, jie bus nagrinėjami vėlesniuose skyriuose. Tačiau iš gautų rezultatų galima pastebėti dar vieną problemą: cemento akmenyje lieka labai dideli kiekiai nesureagavusio klinkerio, todėl betono mišinyje pereikvojama cemento.

3.13 lentelė. Silicio mikrodulkių įtaka betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms

Parametras	Silicio mikrodulkių kiekis, %			
	0	10	15	20
Pasklidimas, cm	37	38	38	37
Dinaminė klampa, Pa·s	44	24	20	35
Tankis, kg/m ³ (be terminio apdorojimo)	2371	2427	2436	2431
Tankis, kg/m ³ (kai terminis režimas T-80)	2397	2458	2446	2420
Gniuždymo stipris, MPa (be terminio apdorojimo)	95	116	127	110
Gniuždymo stipris MPa (kai terminis režimas T-80)	96	127	141	131

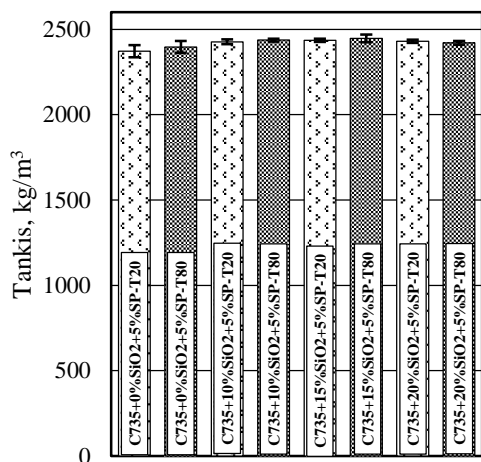
Kaip ir buvo tikėtasi, nepriklausomai nuo taikyto terminio režimo, visų nagrinėtų sudėčių betoninių bandinių tankis buvo labai panašus ~2400 kg/m³. Mažiausias tankis pastebėtas betono mišinyje, kuriame nebuvo panaudota silicio mikrodulkių, nedaug didesnis tankis pastebėtas mišinyje, kuriame buvo panaudota 15 % silicio mikrodulkių (3.13 lentelė bei 3.35 ir 3.36 paveikslai).

3.14 lentelė. Cemento akmenis su skirtingu silicio mikrodulkių kiekybinės rentgenografinės analizės rezultatai

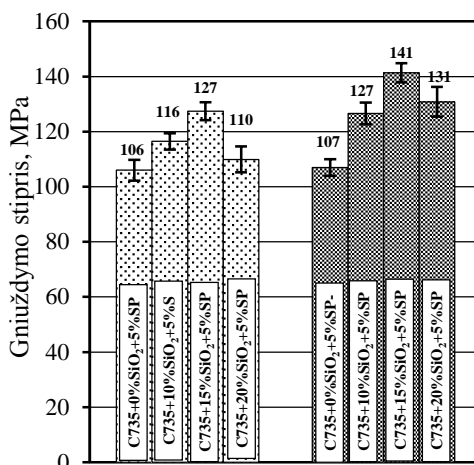
Sudėtis		Fazė									
		Amorfinė	C ₂ S	C ₃ A	C ₃ S	C ₄ AF	Kalcitas	Entringitas	Periklazas	Portlanditas	Vateritas
(C735+0%SiO ₂ +5%SP)-T20	Kiekis, %	36,9	17,8	1,7	20,3	7,2	3,0	0,5	2,0	11,9	0,0
	SN, %	3,3	2,9	0,5	1,1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,7	0,0
(C735+0%SiO ₂ +5%SP)-7D-T80	Kiekis, %	41,8	17,0	1,1	15,6	6,6	3,2	0,0	1,6	13,1	0,0
	SN, %	3,6	3,3	0,5	1,2	1,0	0,7	0,0	0,4	0,8	0,0
(C735+0%SiO ₂ +5%SP)-T80	Kiekis, %	40,9	19,0	1,3	14,2	6,4	3,3	0,0	1,6	13,6	0,0
	SN, %	3,3	3,0	0,5	1,0	0,9	0,6	0,0	0,3	0,9	0,0
(C735+10%SiO ₂ +5%SP)-T20	Kiekis, %	41,2	17,4	1,5	19,9	7,4	3,9	0,5	1,8	7,5	0,0
	SN, %	3,0	2,9	0,5	1,1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,7	0,0
(C735+10%SiO ₂ +5%SP)-7D-T80	Kiekis, %	36,8	18,6	1,4	19,6	7,1	5,1	1,6	2,0	5,0	2,9
	SN, %	3,9	3,6	0,6	1,3	1,0	0,8	0,7	0,5	0,5	0,6
(C735+10%SiO ₂ +5%SP)-T80	Kiekis, %	43,1	18,5	1,2	19,1	6,1	3,8	0,0	1,6	4,5	2,4
	SN, %	3,0	3,0	0,5	1,1	0,8	0,6	0,0	0,4	0,5	0,5
(C735+15%SiO ₂ +5%SP)-T20	Kiekis, %	42,2	17,2	1,3	19,4	6,8	2,7	0,0	1,7	5,1	0,0
	SN, %	3,3	3,3	0,5	1,2	0,9	0,7	0,5	0,4	0,5	0,0
(C735+15%SiO ₂ +5%SP)-7D-T80	Kiekis, %	42,4	16,9	0,9	23,8	5,6	3,6	2,2	1,5	3,1	0,0
	SN, %	2,9	2,7	0,4	1,0	0,7	0,6	0,5	0,3	0,4	0,0
(C735+15%SiO ₂ +5%SP)-T80	Kiekis, %	46,6	18,5	0,7	20,6	4,7	3,5	1,3	1,5	2,6	0,0
	SN, %	3,0	2,9	0,6	1,1	0,7	0,6	0,5	0,3	0,4	0,0
(C735+20%SiO ₂ +5%SP)-T20	Kiekis, %	47,1	17,0	0,9	19,2	5,6	2,7	1,4	1,3	3,7	0,0
	SN, %	3,0	2,9	0,5	1,1	0,8	0,6	0,6	0,4	0,5	0,0
(C735+20%SiO ₂ +5%SP)-7D-T80	Kiekis, %	45,6	17,8	1,0	21,6	5,2	2,9	1,7	1,3	2,9	0,0
	SN, %	3,3	3,0	0,5	1,2	0,8	0,7	0,6	0,4	0,5	0,0
(C735+20%SiO ₂ +5%SP)-T80	Kiekis, %	47,5	15,9	1,0	21,9	4,7	3,7	0,5	1,7	0,0	2,0
	SN, %	3,3	3,3	0,5	1,2	0,8	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6

Ši tendencija sutapo su nustatytais gniuždymo stiprio rezultatais. Nepriklausomai nuo terminio apdorojimo pobūdžio, gniuždymo stipris buvo didžiausias, kai silicio mikrodulkių buvo 15 %. Kai bandiniai nebuvo termiškai apdoroti, kintant silicio mikrodulkių kiekiui nuo 0 % iki 15 %, gniuždymo stipris padidėjo apie 20 %: nuo 106 MPa iki 127 MPa. Pritaikius terminį apdorojimą (T80), gniuždymo stipris padidėjo apie 30 %: nuo 107 MPa iki 141 MPa. Šie rezultatai sutampa su mažiausiu mišinio klampiu, didžiausiu betono tankiu ir gniuždymo stipriu.

Didžiausias kiekis portlandito buvo surištas bandinyje, kurioje buvo panaudota 20 % silicio mikrodulkių, tačiau mažiausia mišinio klampa, didžiausias tankis ir didžiausias gniuždymo stipris gautas, kai bandinyje panaudota 15 % silicio mikrodulkių. Šie rezultatai patvirtina jau minėtą prielaidą, jog kai mišinyje panaudota 15 % silicio mikrodulkių, gaunama tankesnė dalelių sanglauda ir „idealesnė“ mišinio granulimetrinė sudėtis. Taip pat pagal tyrimo rezultatus galima teigti, jog nebūtinai didesnis aktyviojo mineralinio priedo kiekis nulems geresnes betono mechanines savybes – nemažai įtakos turės ir tokios savybės kaip optimali mišinio granulimetrinė sudėtis, likęs oro kiekis, vandens cemento (rišiklio) kiekis, technologinės mišinio savybės ir t. t. Pagal gautus tyrimo rezultatus galima teigti, jog didesnio kaip 15 % silicio mikrodulkių kiekio mišinyje dėl ekonominių ir technologinių priežasčių naudoti nėra tikslinga.



3.35 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka betono tankiui



3.36 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka betono gniuždymo stipriui

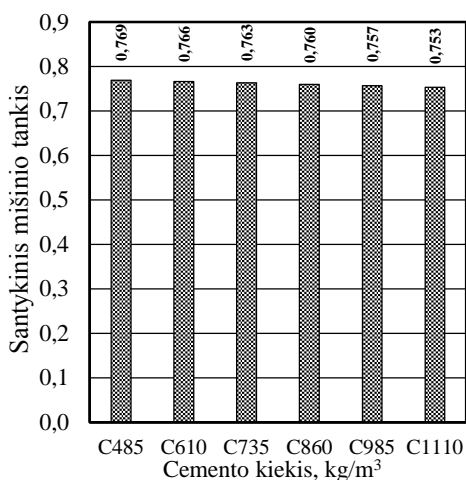
3.3.4. Racionalios betono mišinio granulimetrinės sudėties parinkimas

Projektuojant betono mišinio sudėtį eksperimentiniais tyrimais buvo rastas racionalus cemento (735 kg/m^3), superplastiklio ($36,76 \text{ kg/m}^3$) ir silicio mikrodulkių (110 kg/m^3) kiekis. Siekiant pagrįsti cemento, silicio mikrodulkių, malto kvarcinio smėlio ir #0/1,6 mm frakcijos kvarcinio smėlio kiekius, tolesni eksperimentiniai tyrimai atlikti projektuojant mišinio granulimetrinę sudėtį. Mišinio granulimetrinę kreivę parinkta taip, jog būtų kuo artimesnė „ideali“ mišinio granulimetrinei kreivei. „Ideali“ mišinio granulimetrinė kreivė apskaičiuota pagal modifikuotą Funk (1994) metodą. Taikant šį metodą buvo įvertinama mažiausia mišinio dalelė (d), didžiausia mišinio dalelė (D), dalelių praskirimo koeficientas (q) ir laikomasi prielaidos, jog visos mišinio dalelės yra sferinės formos, skaičiavimo metu vandens kiekis nevertintas. Mišinio tankiausia dalelių sanglauda apskaičiuota pagal Schwanda (1966) metodą. Taikyti metodai aprašyti literatūros analizėje.

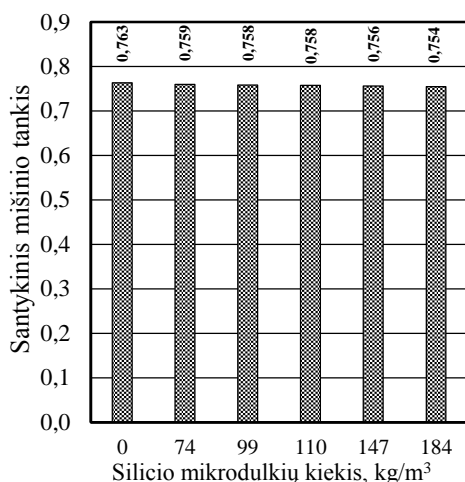
3.15 lentelė. Ypač stipraus betono mišinio sudėtys

Sudėties Nr.	Cementas ^[1] , kg/m ³	Silicio mikro dulksės ^[2] , kg/m ³	Maltas kvarcinis smėlis ^[3] , kg/m ³	Kvarcinis smėlis ^[4] #0/1.6 mm, kg/m ³
MKS-0	735	99	0	1374
MKS-138			138	1236
MKS-275			275	1099
MKS-412			412	962
MKS-549			549	825
MKS-686			686	688
MKS-1374			1374	0

Pastaba: ¹ – AB „Akmenės cementas“, ² – AB BASF; ^{3,4} – AB „Anykščių kvarcinis smėlis“.

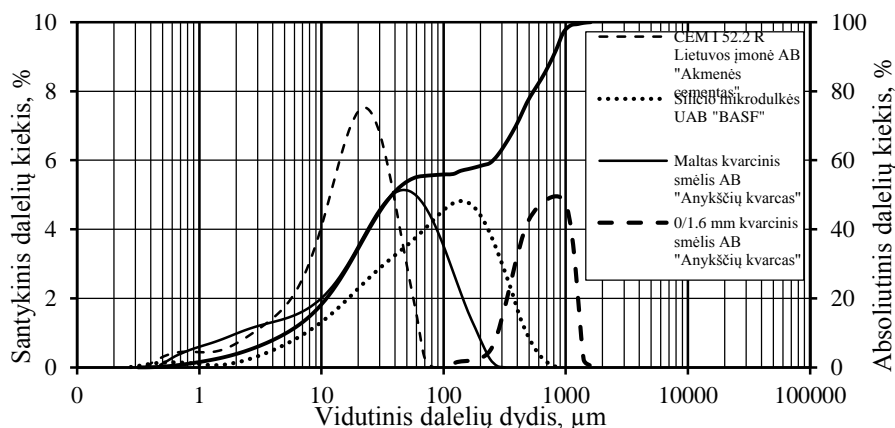


3.37 pav. Cemento kiekio įtaka santykiniam mišinio tankiui



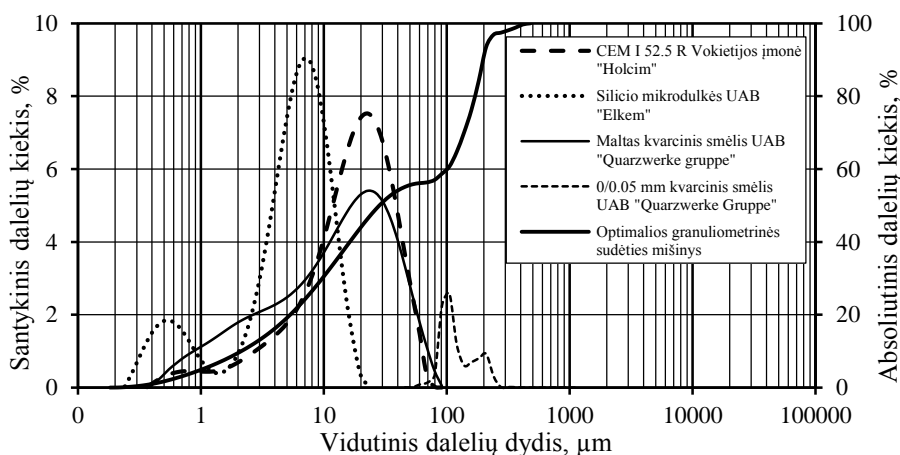
3.38 pav. Silicio mikrodulkių kiekio įtaka santykiniam mišinio tankiui

Siekiant nustatyti, kokios įtakos cemento kiekis turės santykiniam mišinio tankiui, eksperimentiniuose tyrimuose naudotas cementas buvo keičiamas į maltą kvarcinį smėlį (**3.15 lentelė**). Nustatyta, jog didėjant cemento kiekiui nuo 485 kg/m³ iki 1110 kg/m³, santykinis mišinio tankis, nepriklausomai nuo panaudoto cemento kiekio (**3.37 paveikslas**), išliko labai panašus (0,76). Todėl racionalus cemento kiekis (735 kg/m³) parenkamas pagal gautus gniuždymo stiprio rezultatus. Panaši tendencija pastebėta ir kai buvo panaudotos silicio mikrodulkės (**3.38 paveikslas**). Didėjant mišinyje silicio mikrodulkių kiekiui nuo 0 % iki 20 %, santykinis mišinio tankis praktiškai nepakito ir buvo apie 0,75. Taip pat pastebėta, jog ir kitų mikroužpildų granulimetrinės kreivės yra labai panašios (**3.39 paveikslas**). Naudotų komponentų dalelės pasiskirsčiusios panašiu dalelių dydžio intervalu, todėl, keičiant vienas medžiagas kitomis, santykinis mišinio tankis praktiškai nesikeičia. Norint išgauti tankesnę dalelių sanglaudą, betono mišinyje turi vyrauti atitinkamas dalelių pagal dydį išsidėstymas, kuris įmanomas tik tuomet, kai mišinyje medžiagos parenkamos taip, jog esančios smulkesnės dalelės galėtų užpildyti tarpus tarp stambesnių dalelių.



3.39 pav. Optimali mišinio granulimetrinė kreivė, kai naudotos lietuviškos medžiagos ir didžiausias dalelės dydis – 1600 μm

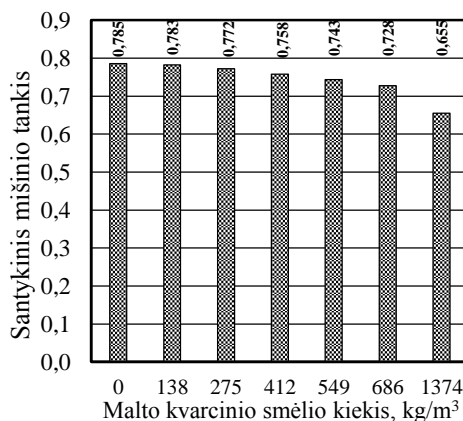
Pagal LST EN 206:2014, įprastinės sudėties betonuose silicio mikrodulkių kiekis betone neturėtų viršyti 11 % (cemento masės), tačiau eksperimentiškai buvo nustatyta, jog technologiškiausias mišinys ir geriausi gniuždymo stiprio rezultatai buvo gauti, kai buvo panaudota 15 % (cemento masės) silicio mikrodulkių. Nustatyta, jog sumažinus silicio mikrodulkių iki 13,5% (cemento masės) arba 99 kg/m^3 santykinis mišinio tankis nepakinta, ši vertė yra šiek tiek artimesnė LST EN 206:2014 keliamiems reikalavimams. Todėl toliau skaičiuojant tariama, jog betono mišinyje bus naudojama 99 kg/m^3 silicio mikrodulkių.



3.40 pav. Optimali mišinio granuliometrinė kreivė, kai naudotos vokiškos medžiagos ir didžiausias dalelės dydis – $500 \mu\text{m}$

Kur kas įdomesni rezultatai pastebėti, kai maltas kvarcinis smėlis buvo pakeistas #0/1,6 mm frakcijos kvarciniu smėliu (**3.40 paveikslas**). Apskaičiuota, jog, didėjant malto kvarcinio smėlio kiekiui nuo 0 kg/m^3 iki 1374 kg/m^3 , santykinis mišinio tankis sumažėjo daugiau nei 16 %, nuo 0,785 (malto kvarcinio smėlio kiekis 0 kg/m^3) iki 0,655 (malto kvarcinio smėlio kiekis 1374 kg/m^3).

Šie skaičiavimai kaip tik įrodo anksčiau minėtą prielaidą, jog, nesant tinkamam dalelių pagal dydį pasiskirstymui, santykinis mišinio tankis pradeda mažėti. Naudojant mikroužpildus, kurių granuliometrinės kreivės yra labai panašios, efektyvesnio dalelių pasiskirstymo pagal dydį pasiekti negalima – priešingai, santykinis mišinio tankis pradės mažėti, nes užpildų dalelių dydžiai yra labai panašūs. Šiuo atveju naudoti mikroužpildai neatlieka mikroužpildo paskirties ir tampa stambiausiu mišinio užpildu, o smulkesnių medžiagų, kurios galėtų užpildyti tarpus tarp mikroužpildų, nebelieka. Toliesniems tyrimams malto kvarcinio smėlio kiekis pasirenkamas 412 kg/m^3 . Šis kiekis pasirinktas pagal literatūros analizėje nagrinėtų kitų



3.41 pav. Malto kvarcinio smėlio įtaka santykiniam mišinio tankiui

mokslininkų teikiamas rekomendacijas. Panašios tendencijos buvo pastebėtos ir naudojant #0/0,5 mm frakcijos kvarcinį smėlį (**3.41 paveikslas**). Pagal gautus skaičiavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatus buvo nustatytos mišinių su #0/0,5 mm ir #0/1,6 mm frakcijos kvarciniu smėliu optimalios granulimetrinės kreivės, skaičiuojant buvo tariama, jog mažiausia mišinio dalelė yra $d = 0,25 \mu\text{m}$, didžiausia mišinio dalelė (D) atitinkamai $500 \mu\text{m}$ ir $1600 \mu\text{m}$, dalelių praskyrimo koeficientas $q = 0,30$. Apibendrintos mišinių sudėtys pateiktos **3.16 lentelėje**. Rekomenduojamų mišinių santykinis mišinio tankis yra apie 0,75 ir šis dydis parodo, jog suprojektuota ypač stipraus betono mišinio sudėtis dar toliau gali būti optimizuojama, tačiau naudojant vietines žaliavas tai pasiekti yra sudėtinga. Tolesnis mišinio santykinis tankis galėtų būti didinamas keičiant naudotų komponentų smulkumą ir parenkant racionalų vandens kiekį. Skaičiuojant nebuvo vertinta, kaip, vykstant cheminiams procesams, keičiasi cemento teslos tūris. Tai bus nagrinėta kituose disertacijos etapuose.

3.16 lentelė. Apibendrintos ypač stipraus betono mišinio sudėtys

Komponentas	Malto kvarcinio smėlio frakcija	
	#0/0.5 mm	#0/1,6 mm
V/C	–	–
V/R	–	–
Vanduo, kg/m^3	180–230	180–230
Cementas, kg/m^3	735	735
Silicio mikrodulkės, kg/m^3	99	99
Maltas kvarcinis smėlis, kg/m^3	412	412
Kvarcinis smėlis, kg/m^3	962	962
Superplastiklis (SP), kg/m^3	36,76	36,76
Santykinis mišinio tankis (pagal Schwanda)	0,744	0,758

Pastaba: Naudojant 0/0,5 mm frakcijos kvarcinį smėlį buvo naudojamos Vokietijos įmonių medžiagos; naudojant 0/1,6 mm frakcijos kvarcinį smėlį buvo naudojamos Lietuvos įmonių medžiagos. Rekomenduojami vandens ir superplastiklio kiekiai gali kiek skirtis, priklausomai nuo naudojamo superplastiklio tipo ir pageidaujamos mišinio konsistencijos.

3.3.5. Ypač stipraus betono sudėties skaičiavimo metodika

Įprastinės betono mišinio sudėties skaičiavimo metodikos, kuriomis galima apskaičiuoti prognozuojamą betono gniuždymo stiprį, tinkamos tik iki tam tikros stiprumo ribos. Bandant suskaičiuoti aukštesnės stiprumo klasės betonų gaunamas neadekvačiai didelis cemento kiekis ar pernelyg mažas V/C santykis. Taip yra todėl, kad polinkio kampas tarp aproksimuotos tiesės V/C santykio ir gniuždymo stiprio, esant plačiose V/C riboms, nėra vienodas. Mažėjant V/C santykiui aproksimuotos tiesės polinkio kampas pradeda kisti. Pasiūlytoje skaičiavimo metodikoje įvertinamas kintantis apkrosimuotos kreivės polinkio kampas tarp V/R santykio ir gniuždymo stiprio, todėl metodika tinkama 130–230 MPa gniuždymo stiprio betono sudėčiai skaičiuoti. Formulėse esančios modifikacijos sudarytos remiantis eksperimentinių tyrimų gautais rezultatais bei taikant Funk (1994) skaičiavimo metodą. Ypač stipraus betono priklausomybė tarp V/R santykio ir gniuždymo stiprio pateikta **3.25 paveiksle**.

1. Pagal **3.4 formulę** patikslinamas reikalingas betono gniuždymo stipris:

$$f_p \geq f_{gn.28} + 14; \quad (3.4)$$

čia:

f_p – projektuojamo betono gniuždymo stipris, (MPa);

$f_{gn,28}$ – betono gniuždymo stipris po 28 parų, (MPa);

2. Pagal **3.5 formulę** suskaičiuojamas reikiamas V/R santykis:

$$\frac{V}{R} = \frac{304,33 - f_p}{633,29}; \quad (3.5)$$

3. Pagal **3.6 formulę** parenkamas reikiamas rišiklio kiekis (kg/m³):

$$R = \frac{V}{V/R}; \quad (3.6)$$

čia:

V – vandens kiekis, l ;

R – rišiklio kiekis, kg/m³;

4. Pagal **3.7 formulę** parenkamas aktyviojo mineralinio priedo kiekis (kg/m³):

$$x_{pucol} = \frac{R - C}{k}; \quad (3.7)$$

čia:

C – cemento kiekis (kg/m³);

k – mineralinio priedo aktyvumo koeficientas ($k = 0,6$, kai maltas stiklas ir $k = 1,6$, kai silicio mikrodulkės);

x_{pucol} – aktyviojo mineralinio priedo kiekis (kg/m³).

5. Pagal **3.8 formulę** parenkamas kvarcinio smėlio kiekis.

$$x_{kvrc} = \rho_{kvrc} \cdot \left(1000 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{x_{pucol}}{\rho_{pucol}} - V - P \right); \quad (3.8)$$

čia:

ρ_{kvrc} – kvarcinio smėlio savitasis tankis, kg/m³;

ρ_c – cemento savitasis tankis, kg/m³;

ρ_{pucol} – aktyviojo mineralinio priedo savitasis tankis, kg/m³;

V – vandens kiekis, l ;

P – porų kiekis betono mišinyje (20 dm³/m³ arba 2 %);

6. Pagal Funk (1994) metodą apskaičiuojama optimali betono mišinio granulimetrinė sudėtis:

$$P(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \cdot 100\%; \quad (3.9)$$

čia:

$P(d)$ – suminis dalelių smulkesnių už d kiekis, %;

d – tam tikro dydžio dalelė, μm ;

d_{\min} – mažiausioji užpildo dalelė, μm ;

d_{\max} – didžiausioji užpildo dalelė, μm ;
 q – užpildo dalelių pasiskirstymo koeficientas (0,20-0,37);

7. Pagal apskaičiuotus medžiagų kiekius nubraižoma mišinio granulimetrinė kreivė. Tūrinės medžiagų koncentracijos gali būti patikslintos pagal optimalią mišinio granulimetrinę kreivę.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

3.1. Nustatyta, jog Brouwers (2005) matematinis modelis, kuriuo galima prognozuoti cemento akmens struktūros parametrus, yra tinkamas tik esant didesnėms vandens ir rišiklio santykio ($V/R \geq 0,30$) vėrtėms. Mažėjant V/R santykiui, gauti duomenys tampa nebetikslūs. Modelis netinkamai įvertina kompleksinį malto stiklo bei silicio mikrodulkių poveikį prognozuojant cemento akmens struktūros parametrus.

3.2. Ankstyvuoju kietėjimo laikotarpiu (iki 28 paros) maltas stiklas nėra toks efektyvus pucolaninis priedas, kaip silicio mikrodulkės, tačiau kietinant gerokai ilgesnį kietėjimo laikotarpį (daugiau nei 3 metai) malto stiklo pucolaninis efektyvumas padidėja.

3.3. Malto stiklo pucolaninis aktyvumas labiausiai priklauso nuo kietinimo sąlygų, aktyvumas bus tuo didesnis, kuo kietėjimo temperatūra bus didesnė.

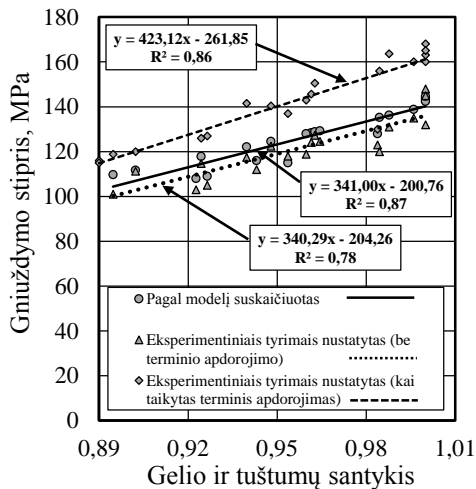
3.4. Atlikus kokybinę ir kiekybinę rentgenografinę bei ^{29}Si spektrografinę analizę paaiškėjo, jog maltas stiklas veikia kaip hidratacijos greitiklis, kuris suintensyvina klinkerio mineralų hidratacijos procesą, tačiau taip pat turi ir pucolaniniam priedui būdingų savybių.

3.5. Pagal Schwanda matematinį modelį buvo optimizuota ypač stipraus betono mišinio granulimetrinė sudėtis. Pagal modelį nustatyta, jog tinkamos granulimetrinės sudėties mišinys galėtų būti išgaunamas vietoj malto kvarcinio smėlio panaudojant maltą stiklą.

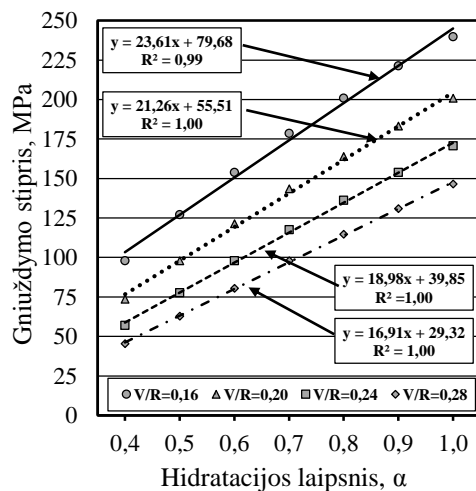
4. FIZIKINIŲ IR MECHANINIŲ SAVYBIŲ ĮTAKA YPAČ STIPRAUS BETONO STRUKTŪROS PARAMETRAMS

4.1. Betono stiprumo savybių įtaka įvairiems struktūros parametrams

Ypač stipraus betono gniuždymo stiprio prognozavimas atliktas pagal Amen (2011) modelio pateiktas rekomendacijas. Šis modelis yra Powers (1946) modelio modifikuota versija, skirta prognozuoti ypač stipriems betonams, kurių V/C kinta nuo 0,23 iki 0,33. Šio skyriaus pagrindinis tikslas – teoriškai pagal modelį apskaičiuotus rezultatus palyginti su eksperimentinių tyrimų gautomis vertėmis. Skaičiuojant buvo laikomasi šių autorių pasiūlytų prielaidų: 1 ml hidratavusio cemento užima 2,060 ml tūrio, o 1 ml rišiklio užima 2,132 ml tūrio; cemento akmens gniuždymo stipris – 120 MPa (kai nenaudojamas rišiklis) ir 140–235 MPa (kai naudojamas rišiklis), koeficientas, įvertinantis kreivės polinkį, – 2–3. V/R santykio, cemento akmens hidratacijos laipsnio ir gniuždymo stiprio pradiniai duomenys ir rezultatai paimti iš ankstesnių skyrių. Skaičiavimo formulės pateiktos literatūros analizėje.



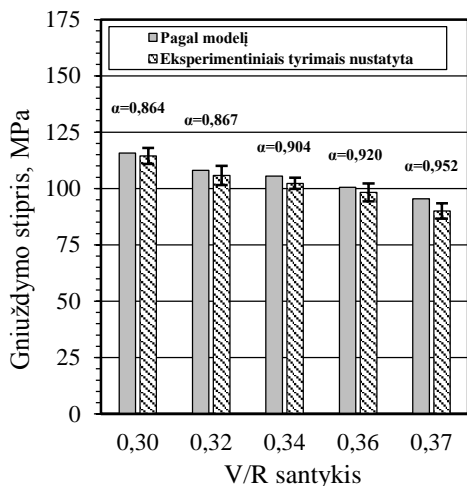
4.1 pav. Gelio ir tuštumų santykio įtaka betono gniuždymo stipriui



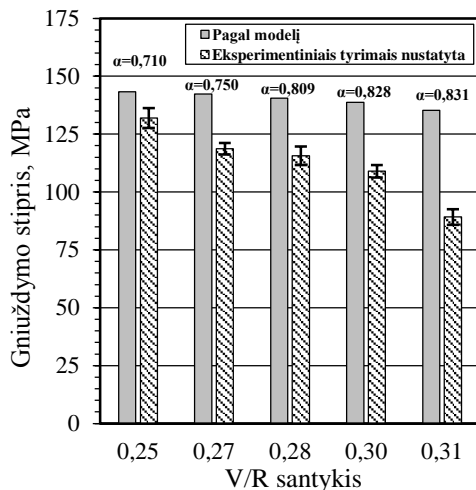
4.2 pav. Hidratacijos laipsnio įtaka betono prognozuojamam gniuždymo stipriui, esant skirtingam V/R santykiui

Cemento akmens ir betoninių bandinių savybės buvo nustatytos po 28 kietėjimo parų. Dalis betoninių bandinių buvo kietinti 20 °C temperatūros vandenyje, o kita dalis buvo termiškai apdoroti (terminis režimas 3+16+5 h) 80 °C temperatūroje, cemento akmens bandiniai buvo kietinti 20±2 °C temperatūros vandenyje. Tyrimų metu pagal modelį suskaičiuotos reikšmės buvo palygintos su eksperimentiniais tyrimais gautais rezultatais, nagrinėtos sudėtyje pateiktos **4.1 ir 4.2 paveiksluose**. Šios priklausomybės sudarytos naudojant 20 skirtingų betono mišinio sudėčių, skaičiuojant gniuždymo stiprį vieno taško vertė nustatyta iš 6 cilindro formos bandinių ($h = 50$ mm ir $d = 50$ mm) ir pateikta kaip vidutinė vertė. Siekiant nustatyti, ar egzistuoja funkcinė priklausomybė tarp gelio ir tuštumų santykio ir teoriškai bei eksperimentiškai apskaičiuoto gniuždymo stiprio (**4.1 paveikslas**). Pastebėta, jog, suskaičiavus pagal modelį prognozuojamą betono gniuždymo stiprį, egzistuoja gana stiprus tiesinis funkcinis ryšys tarp gniuždymo stiprio

bei gelio ir tuštumų santykio (koreliacijos koeficientas – 0,87). Šiuo atveju kintant gelio ir tuštumų santykiui nuo 0,90 iki 1,00, prognozuojamas betono gniuždymo stipris atitinkamai kito nuo 108 MPa iki 145 MPa.



4.3 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai cemento akmenyje nepanaudota jokie aktyviojo mineralinio priedo (C735+0SiO₂+0MS+5%SP)

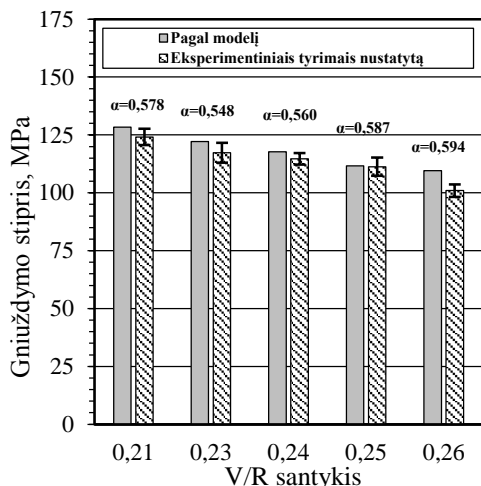


4.4 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai cemento akmenyje panaudotos silicio mikrodulkės (C735+99SiO₂+0MS+5%SP)

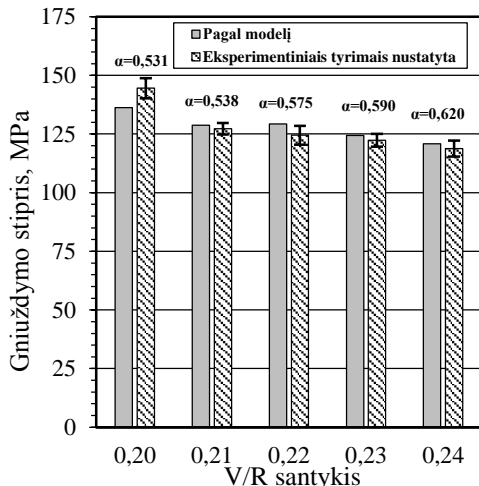
Norėdami patikrinti, ar teoriškai gauti rezultatai sutampa su eksperimentinių tyrimų metu gautais rezultatais ir kokios įtakos terminis apdorojimas turi rezultatams, suformuotiems bandiniams buvo pritaikyti skirtingi kietinimo režimai. Kietinant bandinius 28 paras 20 ± 2 °C temperatūros vandenyje pastebėta, jog taip pat egzistuoja gana stiprus tiesinis funkcinis ryšys tarp gniuždymo stiprio bei gelio ir tuštumų santykio (koreliacijos koeficientas – 0,78), kaip ir atlikus bandinių prognozavimą. Šiuose bandiniuose, kintant gelio ir tuštumų santykiui nuo 0,90 iki 1,00, sugniuždytų bandinių gniuždymo stipris atitinkamai kito nuo 101 MPa iki 148 MPa. Pagal gautus rezultatus pastebėta, jog eksperimentiškai gautos gniuždymo stiprio vertės yra apie 4 % mažesnės nei apskaičiuotos teoriškai (**4.3 paveikslas**).

Šiek tiek mažesnės gniuždymo vertės greičiausiai susijusios su ne visai tinkamai parinktais pradiniais koeficientais. Panaši priklausomybė buvo sudaryta tarp gelio ir tuštumų santykio bei gniuždymo stiprio, kai bandiniai buvo apdoroti termiškai (**4.4 paveikslas**). Taip pat pastebėtas gana stiprus tiesinis funkcinis ryšys (koreliacijos koeficientas – 0,86). Matyti (**4.4 paveikslas**), jog kreivės polinkio kampas taip pat yra labai panašus, skiriasi tik lygties koeficientas. Pagal gautus rezultatus galima teigti, jog šis modelis yra tikslus ir gali būti pritaikytas ypač stipraus betono gniuždymo stipriui prognozuoti, tačiau pagrindinis šio modelio trūkumas – komplikotas tinkamų pradinių koeficientų parinkimas. Pastebėta, jog autorių pasiūlytos pradinių koeficientų reikšmės ir prielaidos nėra iki galo teisingos ir galioja tik tam tikrais atvejais. Keičiantis V/R santykiui, rišiklio kiekiui ir tipui, taip pat turėtų keistis ir koeficientas, kuris įvertina vidutinį cemento akmens stiprį. Turbūt šis koeficientas yra pagrindinis šio modelio trūkumas, kai norima sudaryti įvairias priklausomybes esant skirtingiems V/R santykiams, nes keičiantis V/R santykiui, kinta ne tik cemento akmens ar rišiklio

hidratacijos laipsnis, bet ir kinta betono poringumas, nuo kurio labai priklauso sukietėjusio betono savybės. Pasiūlyta prielaida pasirinkti pastovų koeficientą, kuris įvertina vidutinį cemento akmens stiprį, nagrinėjamu atveju nėra tinkama, greičiausiai dėl šios klaidingos prielaidos rezultatų pasklidimas buvo šiek tiek didesnis nei prognozuotas. Pastebėta, kad prielaida, jog 1 ml rišiklio užima 2,132 ml tūrio, taip pat nėra teisinga, ypač kai V/R santykis tampa mažesnis nei 0,22. Aptikta, jog esant mažesnėms V/R santykio vertėms, gelio ir tuštumų santykio vertė artėja link 1,0, nors dar lieka gana didelis kiekis nesureagavusio rišiklio. Kur kas stipresnis tiesinis funkcinis ryšys buvo gautas sumažinus šį koeficientą nuo 2,132 iki 2,096 (**4.2–4.6 paveikslai**).



4.5 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai cemento akmenyje panaudotas maltas stiklas (C735+0SiO₂+511MS+5%SP)

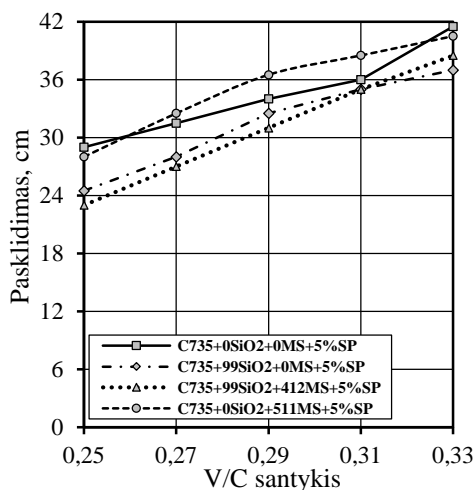


4.6 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai cemento akmenyje panaudotos maltas stiklas ir silicio mikrodulkės (C735+99SiO₂+412MS+5%SP)

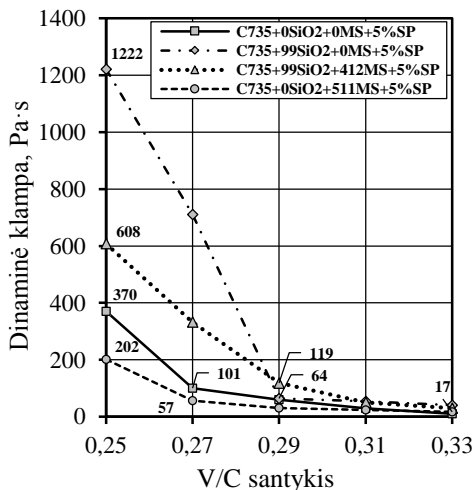
Pagal patikslintus koeficientus ir ankstesnių tyrimų gautus rezultatus buvo sudarytos naujos priklausomybės tarp cemento akmens hidratacijos laipsnio ir prognozuojamo gniuždymo stiprio (**4.2 paveikslas**), o vėliau šie rezultatai palyginti su eksperimentinių tyrimų metu gautais rezultatais (**4.3–4.6 paveikslai**). Pastebėta, jog pakeitus koeficientus buvo gautas gerokai stipresnis tiesinis funkcinis ryšys. Rezultatų sklaida labiausiai priklausė nuo V/R santykio – esant mažesniai V/R santykiui sklaida taip pat yra mažesnė, o priklausomybė tarp V/R santykio ir gniuždymo stiprio nėra tiesinė. Tiesinė priklausomybė egzistuoja esant tik tam tikriems V/R santykiams, peržengus šią ribą kreivės polinkio kampas taip pat pradeda kisti. Tai puikiai matyti iš priklausomybės tarp rišiklio hidratacijos laipsnio ir gniuždymo stiprio, esant skirtingoms V/R santykio vertėms, kurios pateiktos **4.2 paveiksle**. Pagal gautus rezultatus galima teigti, jog priklausomybė tarp V/R santykio ir gniuždymo stiprio nėra tiesinė, todėl modelis nėra tinkamas prognozuoti esant plačioms V/R santykio režiomo ribos. Tačiau nustatyta, jog modelis yra tinkamas taikyti ypač stipraus betono gniuždymo stipriui prognozuoti.

4.2. Ypač stipraus betono savybės

Betono mišinys sumaišytas naudojant vibracinę greitaveikę ir vakuuminę maišyklę. Dalis eksperimentų atlikta naudojant vietines žaliavas, dalis eksperimentų atlikta naudojant Vokietijos įmonių žaliavas. Eksperimentinių tyrimų metu buvo nagrinėtos šios mišinio ir sukietėjusio betono savybės: dinaminė klampa, pasklidimas, tankis, plieninio pluošto įtaka lenkimo, gniuždymo ir susitraukimo deformacijoms. Suformavus bandinius vibracinio tankinimo metodas nebuvo taikytas. Sukietėjusio betono savybės nustatytos po 28 parų. Dalis bandinių buvo termiškai apdoroti (terminis režimas 3+16+5 h) 80 °C temperatūroje, vėliau likusį laiką laikyti 20 °C temperatūros vandenyje, dalis bandinių visą laiką kietinti 20 °C temperatūros vandenyje.



4.7 pav. V/C santykio įtaka betono mišinio pasklidimui



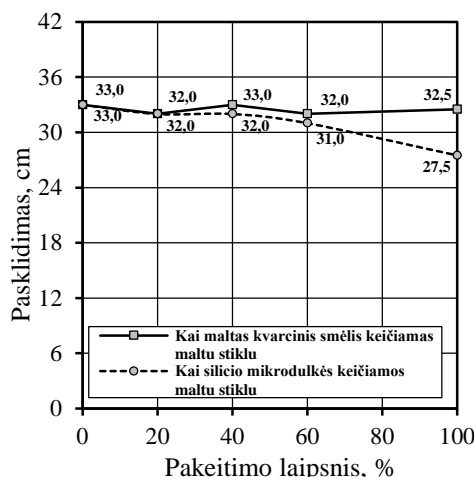
4.8 pav. V/C santykio įtaka betono mišinio dinaminei klampai

Betono mišinys sumaišytas naudojant vibrogreitaveikę ir vakuuminę maišyklę. Dalis eksperimentų atlikta naudojant vietines žaliavas, dalis eksperimentų atlikta naudojant Vokietijos įmonių žaliavas. Eksperimentinių tyrimų metu buvo nagrinėtos šios mišinio ir sukietėjusio betono savybės: dinaminė klampa, pasklidimas, tankis, plieninio pluošto įtaka lenkimo, gniuždymo ir susitraukimo deformacijoms. Po bandinių suformavimo vibrotankinimas nebuvo taikytas. Sukietėjusio betono savybės nustatytos po 28 parų. Dalis bandinių buvo termiškai apdoroti (terminis režimas 3+16+5 h) 80 °C temperatūroje, vėliau likusį laiką laikyti 20 °C temperatūros vandenyje, dalis bandinių visą laiką kietinti 20 °C temperatūros vandenyje.

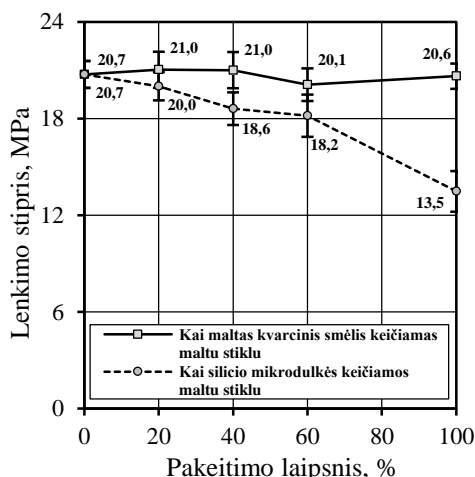
4.2.1. Dinaminė mišinio klampa ir pasklidimas

Betono mišinio pasklidimas ir dinaminė klampa nustatyta naudojant vietines žaliavas, o maišyta vibracine greitaveike maišykle. Pastebėta, jog kintant V/C santykiui nuo 0,25 iki 0,33, visose nagrinėtose betono mišinio sudėtyse pasklidimas kito labai dėsningai, buvo panašus ir svyravo nuo 24 cm iki 40 cm (4.7 paveikslas). Tačiau dinaminė mišinio klampa kito labai nedėsningai ir priklausė nuo mišinio sudėties bei V/C santykio (4.8 paveikslas). Nustatyta, jog kai $V/C = 0,25$, tai didžiausia dinaminė mišinio

klampa (1222 Pa·s) buvo betono mišinyje, kuriame panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas Anykščių karjero kvarcinis smėlis (C735+99SiO₂+0MS+5%SP).

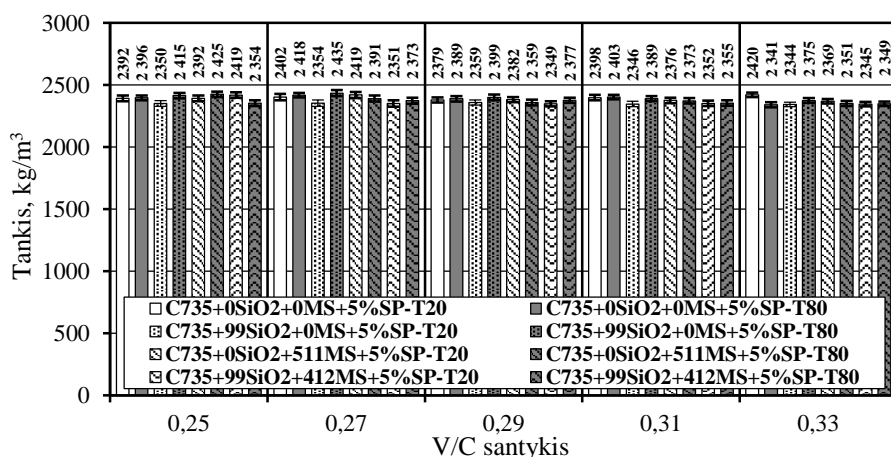


4.9 pav. Malto stiklo kiekio įtaka ypach stipraus betono mišinio pasklidimui (V/C = 0,25)



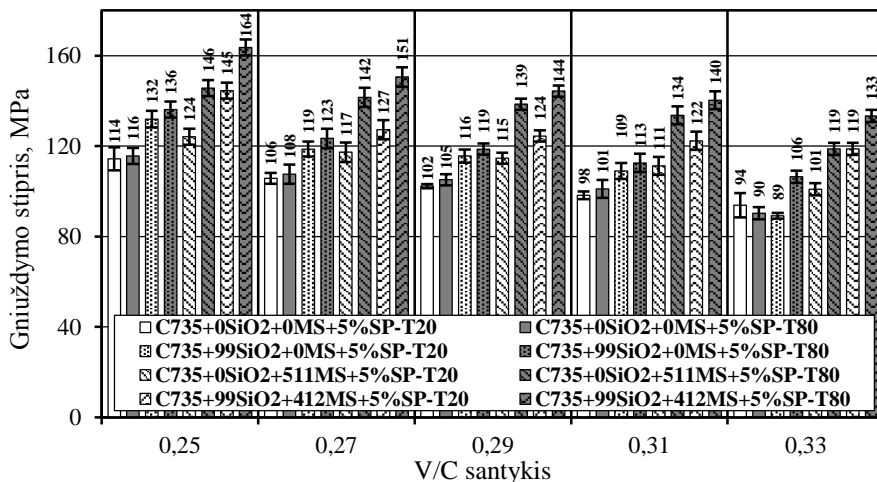
4.10 pav. Malto stiklo kiekio įtaka ypach stipraus betono lenkimo stipriui (V/C = 0,25)

Mažiausia dinaminė mišinio klampa (202 Pa·s) esant tam pačiam V/C santykiui nustatyta betono mišinyje (C735+0SiO₂+511MS+5%SP), kuriame 100 % silicio mikrodulkių ir 100 % Anykščių kvarcinio smėlio buvo pakeista maltu stiklu. Dinaminės mišinio klamos sumažėjimas galėtų būti siejamas su nevienodu malto kvarcinio smėlio (5040 cm²/g) ir malto stiklo smulkumu (3048 cm²/g). Taip pat pastebėta, jog kiekviena sudėtis turi optimalų V/C santykį (0,27–0,29), kuriam esant labai sumažėja dinaminė mišinio klampa. Esant didesniai V/C (>0,29) santykiui, visų nagrinėtų sudėčių dinaminė klampa tampa labai panaši.



4.11 pav. V/C santykio įtaka sukietėjusio betono tankiui: T-20, kai bandiniai 28 paras buvo kietinti 20 °C temperatūros vandenyje; T-80, kai bandiniai po išformavimo buvo termiškai apdoroti (terminis režimas 3+16+5 h) 80 °C temperatūroje, o likusį laiką laikyti 20 °C temperatūros vandenyje

Ekspimentiniais tyrimais nustatyta, jog nėra tiesinio funkcinio ryšio tarp dinaminės mišinio klampos ir pasklidimo. Pastebėta, jog ypač stiprus betono, net ir turinčio mažą klampį, pasklidimas gali būti gana geras. Nustatyta, jog technologiškiausias betono mišinys gautas, kai V/C santykis kito nuo 0,27 iki 0,29, o dinaminė mišinio klampa kito nuo 120 Pa·s iki 60 Pa·s. Pastebėta, jog esant didesniams V/C santykiui nei 0,29, didžiausios užpildo dalelės yra linkusios nusėsti apatinėje bandinio dalyje, o esant mažesniams V/C santykiui nei 0,27, mišinys gali būti per standus ir netechnologiškas, todėl gali kilti problemų naudojant betoną tankiai armuotose konstrukcijose. Pakankamo technologiškumo mišinys praktiškai bus pasiektas visuomet, kai mišinio pasklidimas svyruos nuo 26 cm iki 34 cm.



4.12 pav. V/C santykio įtaka betono gniuždymo stipriui: T-20, kai bandiniai 28 paras buvo kietinti 20 °C temperatūros vandenyje; T-80, kai bandiniai po išformavimo buvo termiškai apdoroti (terminis režimas 3+16+5 h) 80 °C temperatūroje, o likusią laiką laikyti 20 °C temperatūros vandenyje

Siekiant nustatyti, ar maltas stiklas turi įtakos mišinio pasklidimui, eksperimentinio tyrimo metu maltas kvarcinis smėlis ($3350 \text{ cm}^2/\text{g}$) buvo keičiamas panašaus smulkumo maltu stiklu ($3348 \text{ cm}^2/\text{g}$). Šie eksperimentai atlikti naudojant Vokietijos įmonių žaliavas ir vakuuminę greitaveikę maišyklę. Kaip ir buvo tikėtasi, pakeičiant nuo 0 % iki 100 % maltą kvarcinį smėlį maltu stiklu, mišinio pasklidimas praktiškai nepakito ir buvo apie 33 cm (**4.9 paveikslas**). Panašus tyrimas buvo atliktas ir su silicio mikrodulkėmis. Nustatyta, jog, keičiant nuo 0 % iki 100 % silicio mikrodulkes ($20590 \text{ cm}^2/\text{g}$) maltu stiklu ($3348 \text{ cm}^2/\text{g}$), mišinio pasklidimas sumažėjo maždaug penktadaliu – nuo 33 cm iki 27,5 cm. Įdomu tai, jog pakeitus didesnio smulkumo medžiagą (silicio mikrodulkes) į mažesnio smulkumo medžiagą (maltą stiklą), mišinio pasklidimas pradėjo mažėti. Šis fenomenas galėtų būti paaiškintas dėl fizinio silicio mikrodulkių efekto. Silicio mikrodulkės, būdamos sferinės formos ir palyginti mažesnio skersmens už kitus mikroužpildus, sugeba efektyviau užpildyti tuštumas tarp stambesnių mikroužpildų. Tokiu būdu mišinyje lieka mažesnis tuštumų skaičius ir vanduo sugeba efektyviau pasiskirstyti tarp užpildo dalelių, todėl norimos konsistencijos mišiniui reikia mažesnio kiekio vandens.

4.2.2 Ypač stipraus betono fizikinės ir mechaninės savybės

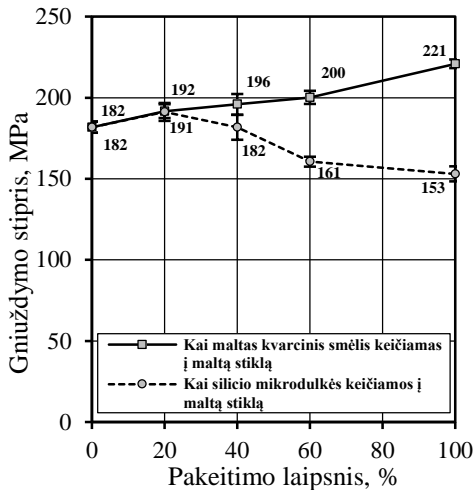
Fizikinės ir mechaninės YSB savybės nustatytos naudojant vietines ir Vokietijos įmonių žaliavas. Maišyta vibracine greitaveike ir vakuumine greitaveike maišyklės. Pastebėta, jog, nepriklausomai nuo nagrinėtos betono mišinio sudėties, V/C santykis ir taikytas kietinimo būdas neturėjo didelės įtakos sukietėjusio betono tankiui, kuris beveik visą laiką buvo pastovus (apie 2400 kg/m^3). Įdomu tai, jog ankstesniuose skyriuose buvo nustatyta, jog V/C santykis, aktyviojo mineralinio priedo tipas, kiekis ir kietinimo režimas turi didelę įtaką cemento akmens hidratacijos naujų formavimuisi. Tačiau sukietėjusio betono tankis daugiausia priklauso nuo pradinių žaliavų tankio, taip pat nuo mišinio granulimetrinės sudėties, o hidratacijos metu susidarę naujadarai daro labai nedidelę įtaką sukietėjusio betono tankiui. Todėl betono tankis nėra geras rodiklis vertinant cemento akmenyje vykstančius pokyčius ir ne visuomet geras rodiklis vertinant sukietėjusio betono mechanines savybes.

Pastebėta, jog sukietėjusio betono gniuždymo stipris labai priklausė nuo V/C santykio, kietinimo būdo, stambiausio užpildo dalelės dydžio bei panaudoto aktyviojo mineralinio priedo rūšies bei maišyklės tipo. Plačiau maišyklės tipo įtaka betono mechaninėms savybėms aptarta kitame skyriuje. Šiame skyriuje daugiausia dėmesio skiriama betono mechaninėms savybėms tirti, esant skirtingam V/C santykiui, skirtingam plieninio pluošto kiekiui bei skirtingam malto stiklo kiekiui.

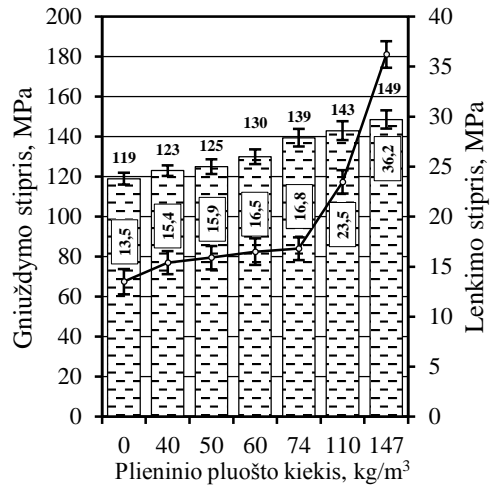
Naudojant #0/1,6 mm frakcijos kvarcinį smėlį ir vietines žaliavas, mažiausias gniuždymo stipris pastebėtas esant betono mišiniui ($\text{C735}+0\text{SiO}_2+0\text{MS}+5\%\text{SP}$), kuriame nebuvo panaudota jokių aktyviųjų mineralinių priedų (**4.13 ir 4.14 paveikslai**). Šioje betono mišinyje kintant V/C santykiui nuo 0,25 iki 0,33, gniuždymo stipris atitinkamai kito nuo 114 MPa iki 94 MPa. Didžiausias gniuždymo stipris pastebėtas mišinyje ($\text{C735}+99\text{SiO}_2+412\text{MS}+5\%\text{SP}$), kuriame panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas. Šiame betono mišinyje kintant V/C santykiui nuo 0,25 iki 0,33, gniuždymo stipris atitinkamai kito nuo 145 MPa iki 119 MPa. Pastebėtas įdomus faktas: betono mišinyje ($\text{C735}+0\text{SiO}_2+0\text{MS}+5\%\text{SP}$), kuriame nebuvo panaudota jokių pucolaninių priedų, po terminio apdorojimo gniuždymo stipris praktiškai nepakito arba sumažėjo nedaug. Nedidelis gniuždymo stiprio sumažėjimas galėtų būti siejamas su tuo, jog mišinyje išsiskyrė didesnis portlandito kiekis. Portlanditas paprastai linkęs kauptis sąlyčio zonoje tarp cemento akmens ir stambiausio užpildo dalelės. Ši zona bus tuo silpnesnė, kuo šioje zonoje bus susidaręs didesnis kiekis portlandito. Mišinyje, kuriame buvo panaudotos silicio mikrodulkės ($\text{C735}+99\text{SiO}_2+0\text{MS}+5\%\text{SP}$), gniuždymo stipris po terminio apdorojimo padidėjo nedaug arba praktiškai liko nepakitęs. Remiantis gautais rezultatais galima teigti, kad betono mišinyje be pucolaninių priedų ir kuriame buvo panaudotos tik silicio mikrodulkės, terminis apdorojimas nėra efektyvus, todėl terminio apdorojimo būdas neturėtų būti taikomas.

Kur kas įdomesni rezultatai buvo pastebėti betono mišiniuose, kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas ($\text{C735}+99\text{SiO}_2+412\text{MS}+5\%\text{SP}$ ir $\text{C735}+0\text{SiO}_2+511\text{MS}+5\%\text{SP}$). Pastebėta, jog kol nėra taikytas terminio apdorojimo būdas, maltas stiklas nėra efektyvus ir veikia kaip silpnas pucolaninis priedas, tačiau po terminio apdorojimo šiuose mišiniuose pastebėtas nuo 20 MPa iki 30 MPa gniuždymo stiprio padidėjimas. Šie rezultatai patvirtina jau minėtą prielaidą, jog maltas stiklas yra puikus pucolaninis priedas ir hidratacijos greitiklis, tačiau efektyviausios jo savybės pasireiškia

tik termiškai apdorojus. Taikant terminio apdorojimo būdą, malto stiklo pucolaninis aktyvumas tampa labai panašus į silicio mikrodulkių arba net šiek tiek yra pranašesnis.



4.13 pav. Malto stiklo kiekio įtaka ypač stipraus betono gniuždymo stipriui (V/C = 0,25)

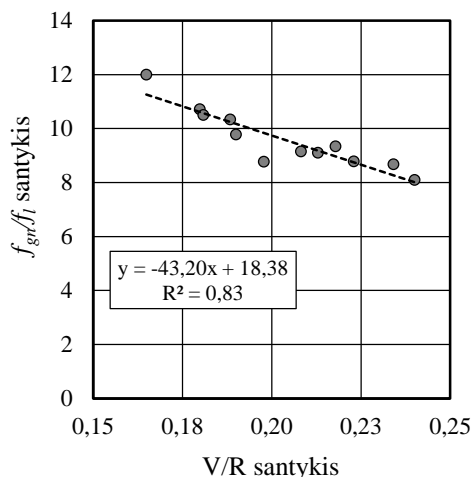


4.14 pav. Plieninio pluošto kiekio įtaka betono lenkimo ir gniuždymo stipriui (V/C = 0,27)

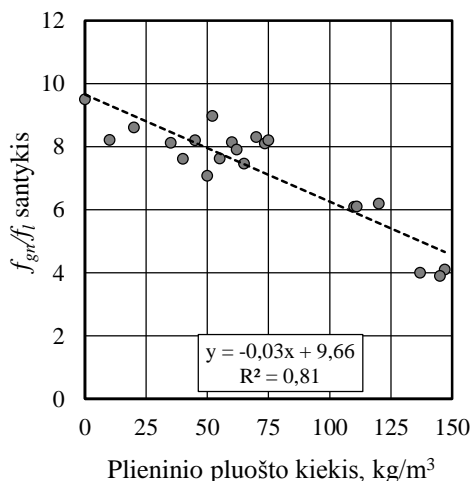
Naudojant 0/0,5 mm frakcijos kvarcinę smėlį ir Vokietijos įmonių žaliavas buvo nustatyta malto stiklo kiekio įtaka ypač stipraus betono gniuždymo stipriui (4.13 paveikslas). Pastebėta, jog betono mišinyje, kuriame panaudotos silicio mikrodulkės ir pakeičiant nuo 0 % iki 100 % maltą kvarcinę smėlį (3350 cm²/g) maltu stiklu (3348 cm²/g), lenkimo stipris praktiškai nepakito ir buvo lygus apie 21 MPa, o gniuždymo stipris padidėjo apie 20 %, nuo 182 MPa iki 221 MPa. Keičiant nuo 0 % iki 100 % silicio mikrodulkes maltu stiklu, lenkimo stipris sumažėjo nuo 20,7 MPa iki 13,5 MPa, o gniuždymo stipris sumažėjo nuo 182 MPa iki 153 MPa. Remiantis gautais rezultatais galima teigti, jog maltas stiklas efektyviausias, kai jame panaudotas ne tik maltas stiklas, bet ir silicio mikrodulkės, tačiau malto stiklo efektyvumas labai priklauso ne tik nuo terminio apdorojimo, bet ir nuo malto stiklo kiekio, kuris turėtų būti nuo 412 kg/m³ iki 511 kg/m³. Taip pat įdomu tai, jog eksperimentinių tyrimų metu buvo gautas labai didelis lenkimo stipris (~21 MPa), nors mišiniuose nebuvo panaudota plieninio armuojančio pluošto.

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, jog laboratorinėmis sąlygomis galima pagaminti ypač stiprų betoną, kurio lenkimo stipris būtų apie 21 MPa, o gniuždymo stipris – apie 220 MPa. Tačiau praktikoje ne visuomet yra galimybių taikyti terminio apdorojimo būdą ar išlaikyti bandinį 28 paras 20 °C temperatūros vandenyje, taip pat betono mišinys turėtų atitikti tam tikrus technologiško betono reikalavimus. Tyrimais nustatyta, jog technologiškausias betono mišinys gautas tuomet, kai V/C santykis svyravo tarp 0,27 ir 0,29. Siekiant imituoti gamybinės sąlygas, išformuoti betono bandiniai buvo laikomi 28 paras orasausėmis laboratorinėmis sąlygomis (santykinė drėgmė – 40–60 % ir temperatūra – 20 °C). Siekiant pagerinti betoninių bandinių savybes, dalyje bandinių buvo panaudotas plieninis armuojantis pluoštas (ilgis – 30 mm, skersmuo – 0,30 mm). Pastebėta (4.14 paveikslas), jog, kintant plieninio pluošto kiekiui nuo 0 kg/m³ iki 147 kg/m³, betono gniuždymo stipris padidėjo apie 25 %, nuo 119 MPa iki 149 MPa, o lenkimo stipris

padidėjo beveik tris kartus – nuo 13,5 MPa iki 36,2 MPa. Pastebėta, kad jei mišinyje panaudota daugiau nei 74 kg/m^3 plieninio pluošto, mišinio technologiškumas labai sumažėja, tad jei konstrukcija bus tankiai armuota, toks kiekis nėra rekomenduotinas. Eksperimentiniuose tyrimuose taip buvo naudojamos ir kitų tipų plieninės ir polipropileninės fibros, tačiau teigiamo rezultato pasiekti nepavyko, todėl plačiau šių eksperimentinių tyrimų rezultatai nebus komentuojami.



4.15 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo ir lenkimo stipriui (f_{gn}/f_l)

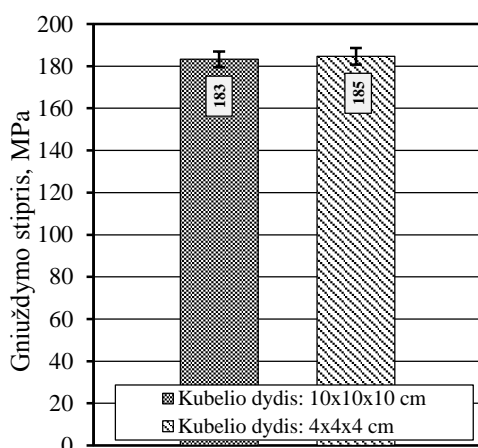


4.16 pav. Plieninio pluošto įtaka betono gniuždymo ir lenkimo santykiui (f_{gn}/f_l), kai ($V/C = 0,27$)

Tiriant plieninio pluošto įtaką betono gniuždymo ir lenkimo stiprių santykiui (f_{gn}/f_l) pastebėta, jog kintat V/R santykiui nuo 0,15 iki 0,25, f_{gn}/f_l santykis sumažėjo nuo 12 iki 8 kartų (**4.15 paveikslas**). Tai reiškia, jog ypač stipraus betono lenkimo stipris yra apie 10 kartų mažesnis, lyginant su gniuždymo stipriu, ir tai yra apie du kartus didesnė vertė, lyginant su įprastinės sudėties betonu. Tačiau f_{gn}/f_l santykis linkęs nedaug mažėti didėjant V/R santykiui. Panaši tendencija pastebėta ir tuomet, kai panaudotas plieninis pluoštas (**4.16 paveikslas**). Nustatyta, jog kai yra išlaikytas pastovus V/C santykis ir mišinyje didėja plieninio pluošto kiekis nuo 0 kg/m^3 iki 147 kg/m^3 , tai f_{gn}/f_l santykis sumažėja nuo 9,5 iki 4 kartų. Tai reiškia, jog didesnis plieninio pluošto kiekis turi teigiamą poveikį betono lenkimo stipriui, o gniuždymo stiprio padidėjimas, lyginant su lenkimo stiprio padidėjimu, yra labai nedidelis.

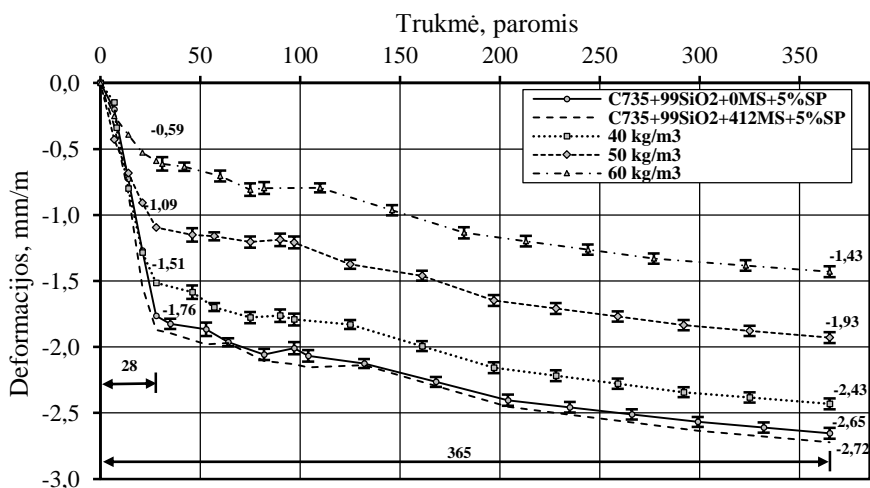
Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, jog bandant skirtingo dydžio ypač stipraus betono bandinius (**4.17 paveikslas**) mastelio dydžio faktoriaus įtakos nėra arba ji yra labai nedidelė, todėl daugelyje tyrimų nustatant bandinių gniuždymo stiprį buvo naudojami cilindro formos bandiniai ($d = 50 \text{ mm}$ ir $h = 50 \text{ mm}$).

Betono susitraukimo deformacijos pradėtos matuoti po paros, iš karto išformavus bandinius. Jie visą matavimo laikotarpį (365 paras) buvo laikomi orasausėmis laboratorinėmis sąlygomis (santykinė drėgmė – 40–60 % ir temperatūra – 20°C). Tyrimuose nagrinėta įprastinė ypač stipraus betono mišinio sudėtis, kai buvo panaudotos silicio mikrodulkės (C735+99SiO₂+0MS+5,00%SP), bei geriausiomis mechaninėmis savybėmis pasižymėjusi betono mišinio sudėtis (C735+99SiO₂+412MS+5,00%SP), kai buvo panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas.



4.17 pav. Mastelio faktoriaus dydžio įtaka ypač stipraus betono gniuždymo stipriui

Pastebėta, jog tiek betono mišinyje, kuriame buvo panaudotas maltas stiklas, tiek betono mišinyje be malto stiklo susitraukimo deformacijos buvo labai panašios (po 365 parų apie $-2,70$ mm/m) ir visą matavimo laikotarpį proporcingai didėjo (**4.18 paveikslas**). Įdomu tai, jog didžiausios deformacijos pastebėtos iki 28 paros, tačiau po 28 paros betoniniai bandiniai toliau proporcingai traukėsi. Remiantis gautus rezultatus galima teigti, jog proporcingai didėjančios susitraukimo deformacijos yra susijusios su tolesniu cemento akmens džiūvimo procesu. Siekiant sumažinti susitraukimo deformacijas, buvo panaudotas plieninis pluoštas (ilgis – 30 mm, skersmuo – 0,30 mm). Nustatyta, jog panaudojant iki 60 kg/m^3 plieninio pluošto, galima sumažinti susitraukimo deformacijas maždaug apie du kartus: atitinkamai nuo $-2,72$ mm/m (be plieninio pluošto) iki $-1,43$ mm/m (kai 60 kg/m^3).



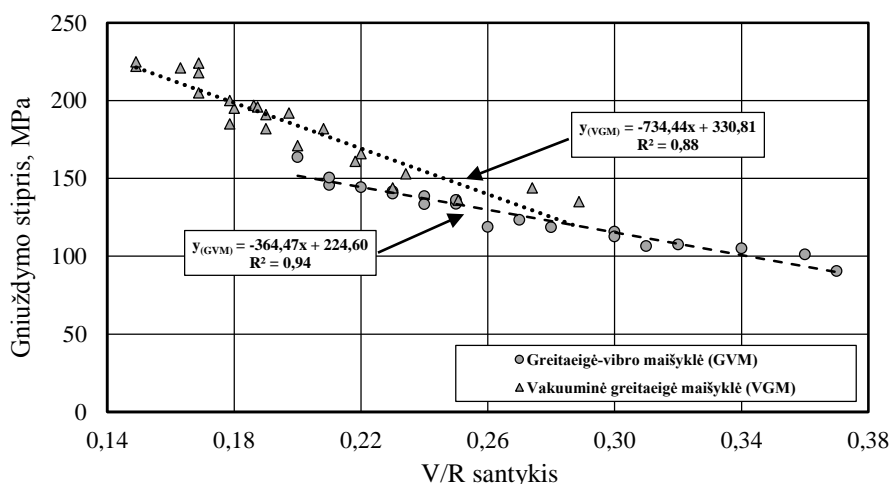
4.18 pav. Plieninio pluošto kiekio įtaka ypač stipraus betono susitraukimo deformacijoms ($V/C = 0,27$)

Nors plieninis pluoštas gali gana labai sumažinti betono susitraukimo deformacijas, tačiau plieninio pluošto pagrindinė paskirtis – sumažinti trapų betono suirimą. Kur kas

efektyvesnis susitraukimo deformacijų mažinimo būdas – taikyti terminį apdorojimą arba naudoti susitraukimą mažinančius cheminius priedus. Susitraukimą mažinantys cheminiai priedai šioje disertacijoje nebuvo nagrinėti. Pritaikius terminį apdorojimą bandiniuose greičiau įvyksta cheminiai procesai, todėl net ir betono mišinyje be plieninio pluošto po terminio apdorojimo galima tikėtis iki 20 kartų mažesnių susitraukimo deformacijų. Siekiant, kad tyrimų rezultatų duomenys neatsikartotų, plačiau susitraukimo deformacijos po terminio apdorojimo bus aptartos kitame skyriuje.

4.2.3. Betono mišinio paruošimo įtaka gniuždymo stipriui

Atliekant eksperimentinius tyrimus buvo naudojama vibracinė, vibracinė greitaveikė ir vakuuminė greitaveikė maišyklės. Betono dinaminė klampa ir pasklidimas buvo aptartas ankstesniuose skyriuose, todėl šiame skyriuje plačiau nebus nagrinėjamas. Pagrindinis šio eksperimento tikslas – nustatyti, kaip skirtingi maišyklių tipai lems sukietėjusio betono gniuždymo stiprį. Tam buvo sudaryta priklausomybė tarp V/R santykio ir sukietėjusio betono gniuždymo stiprio. Gniuždymo stipris buvo nustatytas po 28 parų, bandiniai po išformavimo buvo termiškai apdoroti (terminis režimas 3+16+5 h) 80 °C temperatūroje, o likusį laiką kietinti 28 paras 20 °C temperatūros vandenyje.



4.19 pav. V/R santykio įtaka betono gniuždymo stipriui, kai naudojama greitaveikė vibracinė ir vakuuminė greitaveikė maišyklės

Nagrinėtuose sudėtyse tarp V/R santykio ir gniuždymo stiprio pastebėtas neįprastas rezultatas: kreivės polinkio kampas esant V/R = 0,29 pradeda kisti, priklausomai nuo maišyklės tipo (**4.19 paveikslas**). Pastebėta, jog, naudojant greitaveikę vibracinę maišyklę, egzistuoja labai stiprus tiesinis funkcinis ryšys (koreliacijos koeficientas – 0,94). Šiuo atveju, kintant V/R santykiui nuo 0,20 iki 0,37, gniuždymo stipris atitinkamai kito nuo 90 MPa iki 164 MPa. Tačiau naudojant vibracinę ir vakuuminę greitaveikę maišykles, tiesės polinkio kampas tarp V/R santykio ir gniuždymo stiprio tampa gerokai statesnis. Taip pat pastebėta, jog, naudojant vibracinę ir vakuuminę greitaveikę maišykles, gniuždymo stiprio rezultatų sklaida buvo labai panašu, todėl šiuo atveju rezultatai pateikti vienoje apibendrintoje tiesėje. Naudojant vibracinę ir vakuuminę maišykles buvo gautas gana stiprus tiesinis funkcinis ryšys (koreliacijos koeficientas – 0,88), pastebėta, jog,

kintant V/R santykiui nuo 0,16 iki 0,29, gniuždymo stipris kito atitinkamai nuo 222 MPa iki 135 MPa.

Pakitusį kreivės polinkio kampą būtų galima sieti su skirtingo maišyklių tipo išmaišymo efektyvumu. Kuo intensyviau maišo maišyklė, tuo lengviau pasiekiamas homogeniškesnis mišinys, aktyvieji mineraliniai mikroužpildai išskaido ir tirpsta intensyviau, superplastiklis tampa efektyvesnis. Vibracinė ir vakuuminė maišyklės dar naudingos ir tuo, jog maišydamos sugeba iš mišinyje pašalinti susidariusį orą, dėl to sumažėja sukietėjusio betono poringumas. Esminis vibracinės maišyklės trūkumas – jei mišinys gaunamas labai slankus, maišyklės sukeltos vibracijos nesugeba maišyti mišinio, mišinys efektyviausiai maišomas, kai pasižymi standžiam betonui būdingomis savybėmis. Taip pat eksperimentinio tyrimo metu pastebėta, jog panašių rezultatų galima pasiekti ir naudojant įprastines maišykles, tiesiog reikia 2 ar 3 kartus prailginti maišymo trukmę. Tačiau prailgėjusi maišymo trukmė turi ir neigiamų savybių: nors mišinio homogeniškumas ir bus pasiektas labai panašus, tačiau gamybinėmis sąlygomis dėl technologinių priežasčių tai atlikti kartais gali būti labai sudėtinga ar net neįmanoma. Taip pat pastebėta, jog dėl ilgesnio betono mišinio maišymo gerokai padidėja betono mišinio temperatūra. Padidėjusi betono mišinio temperatūra nėra naudinga dėl kelių priežasčių: 1) prasideda intensyvesnis cemento akmens hidratacijos procesas; 2) vanduo esant aukštesnei temperatūrai užima didesnę tūrį, todėl mišiniui pereinant iš skystosios fazės į kietąją, betono struktūroje bus suformuotos didesnio dydžio poros. Abu šie veiksniai nėra naudingi ir tinkami ypač stipraus betono struktūrai formuoti.

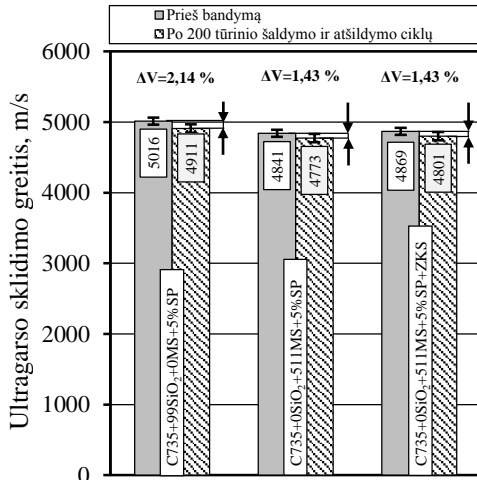
4.3. Ypač stipraus betono ilgalaikiškumas

Ankstesnių eksperimentinių tyrimų metu buvo nustatyta, jog maltas stiklas turi teigiamą įtaką ypač stipraus betono struktūrai ir savybėms. Tačiau pagerėjusios betono mechaninės savybės ne visuomet turi teigiamą įtaką betono ilgalaikiškumui. Todėl tikslinga tam tikras betono ilgalaikiškumo charakteristikas ir savybės panagrinėti išsamiau. Šiame skyriuje nagrinėjamos šios betono ilgalaikiškumo savybės: ankstyvuoju laikotarpiu (po 28 parų) buvo nustatytas betono atsparumas tūriniam ir paviršiniam šaldymui bei atšildymui 3 % NaCl tirpale bei vėlyvuoju laikotarpiu (po 1115 parų) buvo nustatyta, kaip keitėsi betono suminis ir diferencialinis poringumas, patikrinta šarminės korozijos atsiradimo galimybė, nustatyta, kaip įvairiais laikotarpiais keitėsi betono gniuždymo stipris.

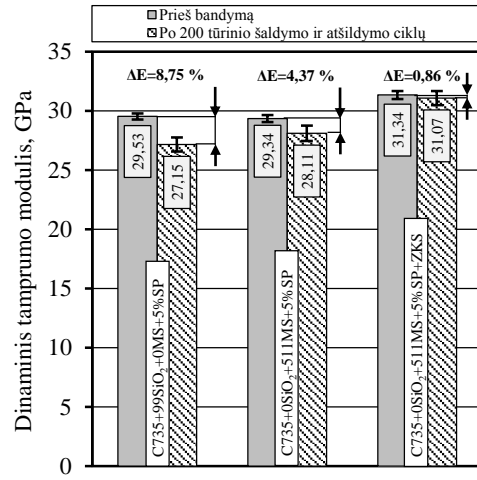
4.3.1. Betono atsparumas cikliškam tūriniam šaldymo ir atšildymo poveikiui

Tiriant betono atsparumą cikliškam tūriniam šaldymui ir atšildymo poveikiui, buvo naudojamos vietinės žaliavos. Bandiniai buvo kietinti 28 paras 20 °C temperatūros vandenyje. Po 28 parų dalis bandinių buvo mechaniškai sugniuždyti, dalis bandinių buvo palikti įmirkti 3 paras 3 % NaCl tirpale. Siekiant detaliau įvertinti struktūroje vykstančius pakitimus, betono struktūra buvo tiriama neardančiais tyrimo metodais (ultragarsiniu ir dinaminio tamprumo modulio). Pagrindinis šio skyriaus tikslas – ištirti taikytų metodų patikimumą ir nustatyti, kuris iš taikytų neardančių tyrimo metodų tinkamesnis vertinant bandinių būklę veikiant cikliškam šaldymo ir atšildymo poveikiui. Eksperimentinio tyrimo metu buvo naudojami cilindro ($d = 50$ mm ir $h = 50$ mm) ir prizmės ($40 \times 40 \times 160$ mm) formos bandiniai, betono mišinys maišytas vibracine maišykle. Siekiant pašalinti

drėgmės poveikio įtaką, prieš bandymą bandiniai buvo 24 h džiovinami laboratorinėje aplinkoje (temperatūra 20 °C, santykinė drėgmė – 40–60 %).



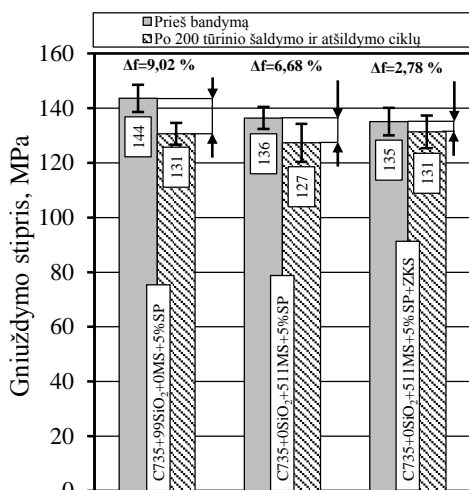
4.20 pav. Ultragarso sklaidimo greičio pokytis prieš ir po 200 tūrinio šaldymo bei atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale ($V/C = 0,25$)



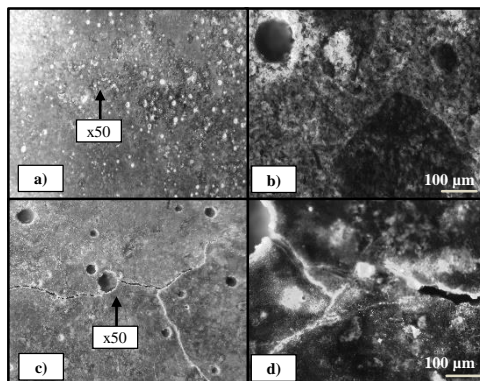
4.21 pav. Dinaminio tamprumo modulio pokytis prieš ir po 200 tūrinio šaldymo bei atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale ($V/C = 0,25$)

Ultragarso sklaidimo greitis buvo matuojamas prizmės ir cilindro formos bandiniuose. Matavimai atlikti tiesioginio perėjimo būdu, rezultatai pateikti **4.20 paveiksle**. Pastebėta, jog po 200 tūrinio šaldymo ir atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale, ultragarso sklaidimo greitis tirtuose bandiniuose pradėjo mažėti proporcingai. Didžiausias ultragarso sklaidimo greičio pokytis ($\Delta V = 2,14$ %) nustatytas esant standartinei ypač stipraus betono mišinio sudėčiai (C735+99SiO₂+0MS+5%SP), kuriame buvo panaudotos silicio mikrodulkės ir vietoj malto kvarcinio smėlio (savitasis paviršius – 5040 cm²/g) panaudotas maltas granitas (savitasis paviršius – 4500 cm²/g). Betono mišiniuose, kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas (C735+0SiO₂+511MS+5%SP), ir betono mišiniuose (C735+0SiO₂+511MS+5%SP+ZKS), kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas ir vietoj #0/1,6 mm frakcijos Anykščių karjero kvarcinio smėlio panaudotas #0/2,0 mm frakcijos Zatyšių karjero smėlis, ultragarso sklaidimo greičio pokytis ($\Delta V = 1,43$ %) buvo mažesnis nei esant standartinei sudėčiai.

Panašūs tyrimo rezultatai buvo gauti ir taikant dinaminio tamprumo modulio nustatymo metodą (**4.21 paveikslas**). Tačiau pastebėta, jog betono mišinyje (C735+0SiO₂+511MS+5%SP), kai buvo panaudotas maltas stiklas, dinaminio tamprumo modulio pokytis buvo daugiau nei perpus mažesnis, o betono mišinyje (C735+0SiO₂+511MS+5%SP+ZKS), kai buvo panaudotas ir maltas stiklas ir Zatyšių karjero smėlis, dinaminio tamprumo modulio pokytis buvo mažesnis daugiau nei 10 kartų, lyginant su įprastine sudėtimi (C735+99SiO₂+0MS+5%SP), kai buvo panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas granitas. Esminį taikytų metodų skirtumą išryškino tiesinio funkcinio ryšio stiprumas. Nustatyta, jog tiesinis funkcinis ryšys tarp dinaminio tamprumo modulio ir gniuždymo stiprio (koreliacijos koeficientas $R^2 = 0,83$) yra apie du kartus stipresnis nei tarp ultragarso sklaidimo greičio ir gniuždymo stiprio (koreliacijos koeficientas $R^2 = 0,43$).



4.22 pav. Gniuždymo stiprio pokytis prieš ir po 200 tūrinio šaldymo bei atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale ($V/C = 0,25$)



4.23 pav. Tirtų bandinių paviršius: a – kai nėra įtrūkių; b – padidinus 50×; c – kai yra įtrūkių; d – padidinus 50× ($V/C = 0,25$)

Taip pat labai panašios tendencijos buvo pastebėtos ir nustatant bandinių gniuždymo stiprio pokytį (**4.22 paveikslas**). Esant įprastinei ypač stipraus betono mišinio sudėčiai (C735+99SiO₂+0MS+5%SP) gniuždymo stipris sumažėjo 9,02 %: nuo 144 MPa iki 131 MPa; esant sudėčiai (C735+0SiO₂+511MS+5%SP), kai panaudotas maltas stiklas, gniuždymo stipris sumažėjo 6,68 %: nuo 136 MPa iki 127 MPa, o betono mišinio sudėčiai (C735+0SiO₂+511MS+5%SP+ZKS), kai buvo panaudotas maltas stiklas ir 0/2 mm frakcijos Zatyšių karjero smėlis, gniuždymo stipris sumažėjo 2,78 % – nuo 135 MPa iki 131 MPa.

Eksperimentinių tyrimų metu pastebėta, jog po 200 tūrinio šaldymo ir atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale, kurie atitinka apie 800 šaldymo ir atšildymo ciklą natūraliame vandenyje, tiek ultragarso sklaidimo greičio, tiek dinaminio tamprumo modulio bei gniuždymo stiprio pokytis pradėjo didėti, tačiau vizualiai bandinių paviršiuose jokių defektų nebuvo matyti. Pritaikius fluorescencinį mikroskopijos metodą (**4.23 paveikslas**), kai bandinių paviršius buvo padengtas „PFINDER 902“ fluorescenciniais dažais, o vėliau bandinių paviršius apšviestas ultravioletine šviesa, pastebėta, jog esant mišiniui C735+0SiO₂+511MS+5%SP+ZKS, kuriame panaudotas maltas stiklas ir Zatyšių karjero smėlis, bandinių paviršiuose nepastebėta jokių struktūrinių defektų, matyti tik atvirų porų kavernos (**4.23 paveikslas a ir b**), kurios susidarė formuojant bandinius. Įprastiniame ypač stipraus betono mišinyje (C735+99SiO₂+0MS+5%SP), kuriame buvo panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas granitas bei kuris buvo neatspariausias šalčio ardomajam poveikiui, matyti ryškūs įtrūkiai tiek vizualiai, tiek padidinus 50 kartų (**4.23 paveikslas c ir d**).

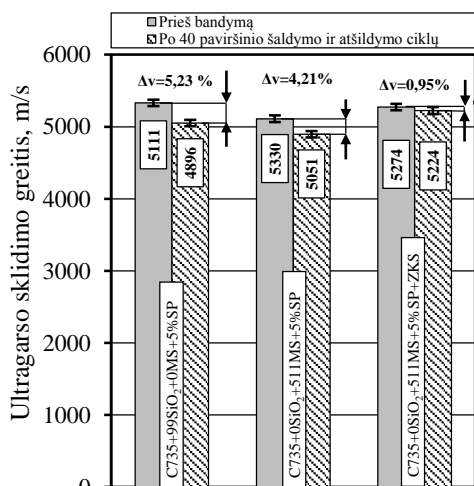
Įdomu tai, jog betono mišinyje (C735+0SiO₂+511MS+5%SP), kuriame buvo panaudotas maltas stiklas, ir betono mišinyje (C735+0SiO₂+ 511MS+5%SP+ZKS), kuriame buvo panaudotas maltas stiklas ir Zatyšių karjero smėlis, tiek ultragarso sklaidimo greičio, tiek dinaminio tamprumo modulio ir gniuždymo stiprio pokytis buvo kur kas mažesnis nei standartiniame ypač stipriame betone (C735+99SiO₂+0MS+5%SP), kuriame buvo panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas granitas. Betono tūrinio šaldymo

ir atšildymo poveikio sumažėjimas greičiausiai daugiausia susijęs su tuo, jog naudojant maltą granitą buvo išgautas „blogesnės“ granulometrinės sudėties mišinys.

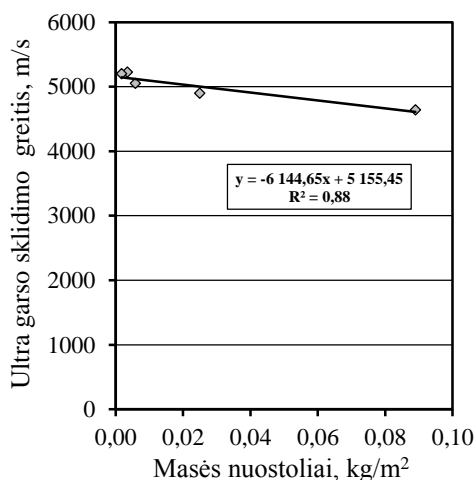
4.3.2. Betono atsparumas cikliškam paviršiniam šaldymo ir atšildymo poveikiui

Paviršinis betono šaldymo ir atšildymo bandymas atliktas naudojant vietines žaliavas ir Švedijos įmonės „Cemex“ portlandcementį 52,2 R. Maišyta naudojant vibracinę maišyklę. Po išformavimo suformuoti bandiniai buvo termiškai apdoroti 80 °C temperatūroje (šutinimo režimas 3+16+5 h), o likusį laiką iki 28 paros kietinti 20 °C temperatūros vandenyje. Tirtų medžiagų savybės nustatytos po 28 parų ir po 40 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų. Po 28 parų dalis bandinių buvo paruošti paviršiniam šaldymui. Paruoštų bandinių paviršius buvo užpiltas 3 % NaCl tirpalu ir paliktas nusistovėti 3 paras 20 °C temperatūroje. Pagrindinis eksperimento tikslas – nustatyti, ar galima taikyti neardomuosius tyrimo metodus tiriant cikliška paviršiniu būdu šaldomų ir atšildomų ypač stiprių betonų bandinių struktūrą ir savybes.

Nustatyta, jog po 40 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale, nepriklausomai nuo tirtos sudėties, tiek ultragarso sklaidimo greičio pokytis, tiek masės nuostoliai buvo labai nedideli (**4.24 ir 4.25 paveikslėliai**). Mažiausias ultragarso sklaidimo greičio pokytis ($\Delta v = 0,95\%$) buvo pastebėtas betono mišinyje, kuriame buvo panaudotas maltas stiklas ir #0/2 mm frakcijos Zatyšių karjero smėlis (C735+0SiO₂+511MS+5%SP+ZKS). Didžiausias ultragarso sklaidimo greičio pokytis ($\Delta v = 5,23\%$) pastebėtas mišinyje (C735+99SiO₂+0MS+5%SP), kuriame buvo panaudotos silicio mikrodulkės. Taip pat pastebėta (**4.25 paveikslas**), jog tarp masės nuostolių ir ultragarso sklaidimo greičio egzistuoja stiprus tiesinis funkcinis ryšys (koreliacijos koeficientas 0,88). Remiantis gautais rezultatais galima teigti, jog ultragarso sklaidimo metodas galėtų būti taikomas tiriant ypač stipraus betono struktūros pokyčius veikiant paviršiniam šaldymui ir atšildymui.

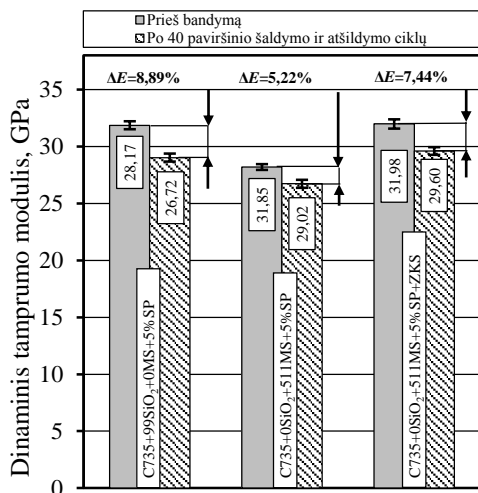


4.24 pav. Ultragarso sklaidimo greičio pokytis prieš ir po 40 paviršinio šaldymo bei atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale (V/C=0,22)

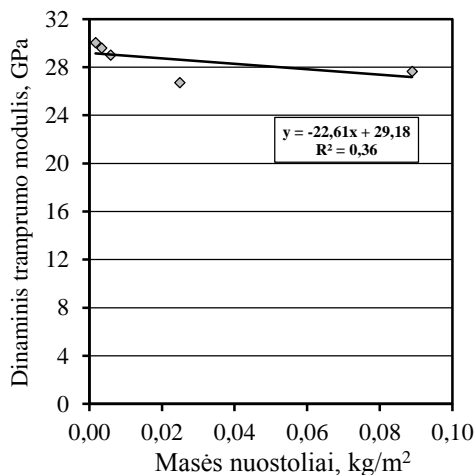


4.25 pav. Tiesinė funkcinė priklausomybė tarp masės nuostolių ir ultragarso sklaidimo greičio (V/C=0,22)

Taikant dinaminio tamprumo modulio nustatymo metodą (4.26 paveikslas) buvo pastebėta, jog po 40 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale visuose tirtuose bandiniuose dinaminio tamprumo modulio pokyčio vertės buvo gerokai didesnės, lyginant su ultragarso sklaidimo greičio vertėmis.

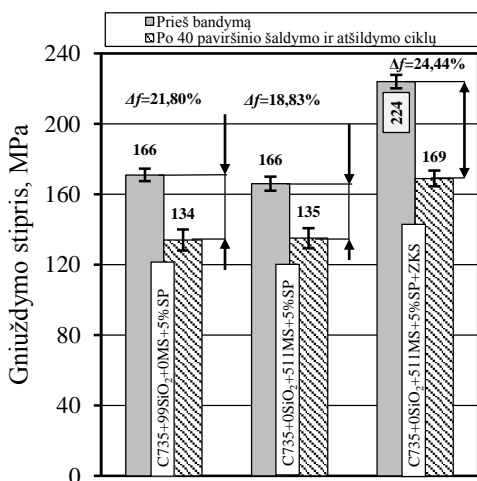


4.26 pav. Dinaminio tamprumo modulio pokytis prieš ir po 40 paviršinio šaldymo bei atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale ($V/C = 0,22$)

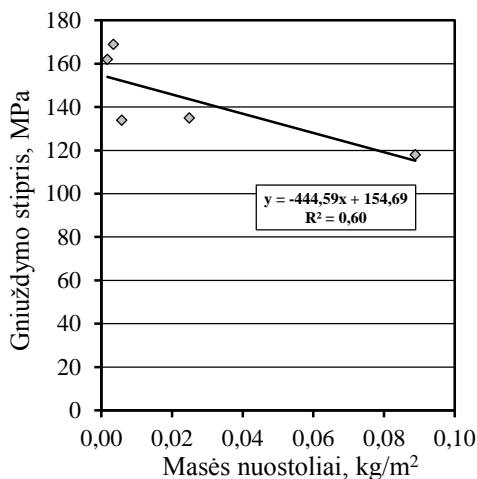


4.27 pav. Tiesinė funkcinė priklausomybė tarp masės nuostolių ir dinaminio tamprumo modulio ($V/C = 0,22$)

Tai leidžia daryti prielaidą, jog dinaminio tamprumo modulio metodas yra gerokai jautresnis tiriant bandinių struktūroje vykstančius pokyčius, tačiau, sudarius priklausomybes tarp dinaminio tamprumo modulio ir masės nuostolių, pastebėta, jog tarp gautų rezultatų egzistuoja silpnas funkcinis ryšys (koreliacijos koeficientas 0,36). Todėl remiantis gautais rezultatais galima teigti, jog šis metodas neturėtų būti taikomas tiriant paviršiniu būdu šaldomų ir atšildomų bandinių būklei vertinti.

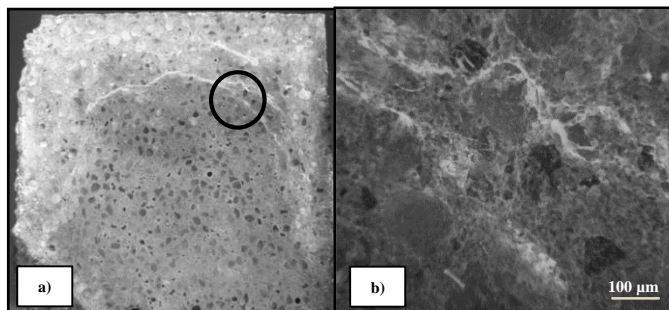


4.28 pav. Gniuždymo stiprio pokytis prieš ir po 40 paviršinio šaldymo bei atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale ($V/C = 0,22$)



4.29 pav. Tiesinė funkcinė priklausomybė tarp masės nuostolių ir gniuždymo stiprio ($V/C = 0,22$)

Po 40 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale didžiausias gniuždymo pokytis buvo pastebėtas mišinyje (C735+99SiO₂+0MS+5%SP+ZKS), kuriame buvo panaudotas maltas stiklas ir #0/2 mm frakcijos Zatyšių karjero smėlis. Šiame mišinyje gniuždymo stipris sumažėjo 24,44 %, nuo 224 MPa iki 169 MPa (**4.28 paveikslas**). Mažiausias gniuždymo stiprio pokytis pastebėtas mišinyje (C735+99SiO₂+0MS+5%SP), kurioje panaudotas maltas stiklas. Šiame mišinyje gniuždymo stipris sumažėjo 18,83 %, nuo 166 MPa iki 135 MPa. Sudarytoje priklausomybėje tarp gniuždymo stiprio ir masės nuostolių (**4.29 paveikslas**) pastebėtas silpnas tiesinis funkcinis ryšys (koreliacijos koeficientas 0,60). Vadovaujantis gautais rezultatais galima teigti, jog gniuždymo stiprio metodas taip pat nėra tinkamas bandinių struktūros būklei vertinti.



4.30 pav. Tirtų bandinių paviršius: a – nepadidintas; b – padidinus 50× ($V/C = 0,22$)

Pastebėta, kad tarp taikytų metodų ir masės nuostolių egzistuoja nevienodo stiprumo tiesinis funkcinis ryšys. Taip greičiausiai nutiko dėl to, jog taikyti metodai pasižymėjo skirtingu jautrumu struktūroje atsiradusiems defektams aptikti. Siekiant paaiškinti, kodėl taikyti metodai pasižymėjo labai silpna tiesine funkine priklausomybe, buvo pritaikytas fluorescencinis mikroskopijos metodas (**4.30 paveikslas**). Pastebėta, jog nepriklausomai nuo tirtos sudėties, visų bandinių irimo pobūdis labai panašus. Didžiausia destruktija buvo pastebėta bandinio paviršiuje, kuri proporcingai mažėjo gilesnių bandinio sluoksnių link. Betonas nėra homogeniška medžiaga, todėl taikyti neardantys tyrimo metodai yra tinkami bandinių struktūroje vykstantiems pokyčiams tirti, tačiau po 40 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklą 3 % NaCl tirpale bandinių paviršiuje esantis sluoksnis tampa daug labiau pažeistas nei bandinio vidurinėje ar apatinėje dalyse. Remiantis gautais rezultatais galima teigti, jog neardomieji tyrimo metodai nėra tinkami bandinių struktūrai vertinti, nes paviršinio šaldymo ir atšildymo bandymo metu pažeidžiama šaldomoji bandinio pusė, o tai lemia netolygius destruktijos pokyčius, dėl kurių taikyti neardomieji tyrimo metodai ne visuomet teisingai pateikia duomenis, dėl kurių galutiniai rezultatai gali būti netikslūs.

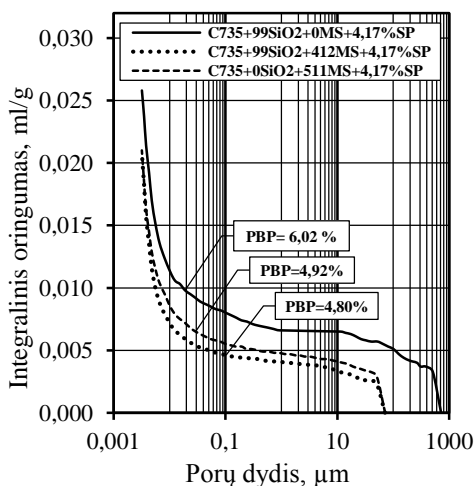
4.3.3. Betono fizikinės ir mechaninės savybės po ilgo kietėjimo laiko

Ankstesnių eksperimentinių tyrimų metu buvo nustatyta, jog maltas stiklas pagerina ypač stipraus betono mikrostruktūrą, atsparumą ardomajam šalčio poveikiui, taip pat turi teigiamą įtaką betono mechaninių savybių pagerėjimui. Tačiau nėra aišku, kaip maltas stiklas pakeis ypač stipraus betono savybes esant ilgesniam kietėjimo laikotarpiui. Šiame bus tiriama, kaip maltas stiklas pakeitė betono suminį ir diferencialinį poringumą, šarminės korozijos atsiradimo galimybę, nustatytas gniuždymo stipris po šarminės

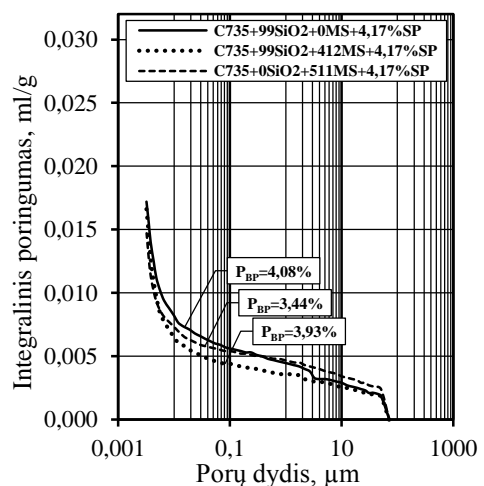
korozijos bandymo ir po 1115 parų kietėjimo 20 °C temperatūros vandenyje. Eksperimentinių tyrimų metu buvo naudojamos Vokietijos įmonių žaliavos, o maišyta vakuumine greitaveike maišykle. Suformuoti bandiniai buvo 60 s vibruojami ant vibracinio stalo „ToniVIB“. Suformuoti bandiniai buvo termiškai apdoroti 80 °C C temperatūroje (šutinimo režimas 3+16+5 h) ir likusį laiką iki 28 paros laikyti 20 °C temperatūros vandenyje.

4.3.3.1. Poringumas

Tirtas trijų reikšmingiausių ypač stipraus betono mišinio sudėčių suminis ir diferencialinis poringumas (**4.31 ir 4.32 paveikslai**). Nustatyta, jog po 28 parų didžiausias suminis poringumas (6,02 %) buvo standartinės sudėties (C735+99SiO₂+0MS+4,17%SP), kai panaudotos silicio mikrodulkės (**4.31 paveikslas**). Šiame betono mišinyje pastebėta, jog didžiausios poros yra išsidėsčiusios mikro- ir makrolygmenimis ties 40–700 μm (**4.31 paveikslas**). Įdomus faktas, jog betono mišiniuose (C735+99SiO₂+412MS+4,17%SP ir C735+0SiO₂+ 511MS+4,17%SP), kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas, makroporingumas sumažėjo, o didžiausios poros buvo mažesnės nei ≤70 μm. Taip pat pastebėta, jog betono mišiniuose (C735+99SiO₂+412MS+4,17%SP ir C735+0SiO₂+511MS+4,17%SP), kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas, bendras poringumas buvo labai panašus (~4,90 %). Makro- ir mikroporingumai turi daugiausia įtakos betono mechaninėms savybėms, todėl šie tyrimai iš dalies papildė ankstesnių eksperimentinių tyrimų rezultatus ir paaiškina, kodėl betono mišiniai, kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas, pasižymėjo geresnėmis mechaninėmis ir ilgalaikiškumo savybėmis.



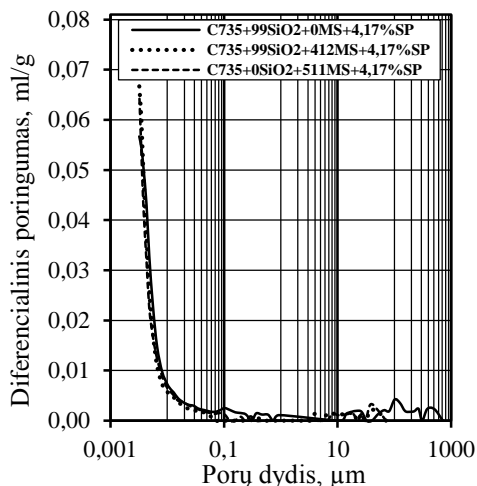
4.31 pav. Betono integralinis porų pagal skersmenis pasiskirstymas, kai savybės nustatytos po 28 parų (V/C=0,25)



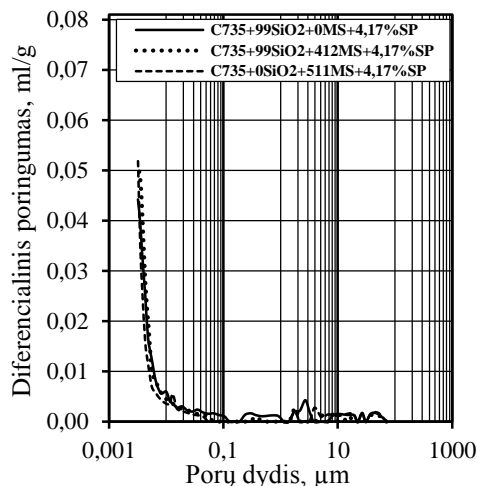
4.32 pav. Betono integralinis porų pagal skersmenis pasiskirstymas, kai savybės nustatytos po 1115 parų (V/C=0,25)

Pastebėta, jog, nepriklausomai nuo to, ar buvo panaudotas maltas stiklas, visų nagrinėtų sudėčių didžiausia porų koncentracija pastebėta nanolygmeniu ($\leq 0,1 \mu\text{m}$). Šiuo lygmeniu betono poringumas turi daugiausia įtakos betono susitraukimo deformacijoms ir valkšnumui. Šie rezultatai iš dalies patvirtina ankstesnių eksperimentinių tyrimų

rezultatus, kai buvo nustatyta, jog ypač stiprių betono bandinių yra gana didelės susitraukimo deformacijos.



4.33 pav. Betono diferencialinis porų pagal skersmenis pasiskirstymas, kai savybės nustatytos po 28 parų ($V/C=0,25$)



4.34 pav. Betono diferencialinis porų pagal skersmenis pasiskirstymas, kai savybės nustatytos po 1115 parų ($V/C=0,25$)

Labai panašūs tyrimo rezultatai pastebėti ir po 1115 parų (**4.33 ir 4.34 paveikslai**). Pastebėta, jog įprastiniuose betono mišiniuose ($C735+99SiO_2+0MS+4,17\%SP$), kuriuose panaudotos silicio mikrodulkės, taip pat nebelieka makroporingumo. Visuose tirtuose betono mišiniuose tiek bendras poringumas ($\sim 4,00\%$), tiek porų pagal dydį išsidėstymas tampa labai panašus. Po 1115 parų visų bandinių poringumas sumažėjo, o tai leidžia daryti prielaidą, jog vyko tolesnė cemento akmens hidratacija, o galutinis sureagavusio rišiklio kiekis tapo greičiausiai panašus. Šie rezultatai iš dalies patvirtina ankstesnę prielaidą, jog maltas stiklas suintensyvina portlandcementinio hidratacijos procesą. Tačiau maltas stiklas efektyviausiai veikia, kai mišinyje yra panaudotos silicio mikrodulkės.

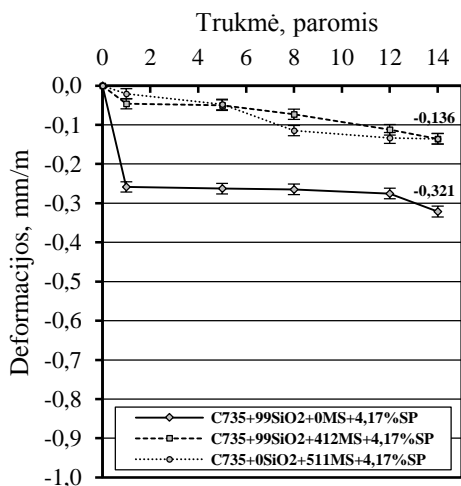
4.3.3.2. Ypač stipraus betono šarminė korozija

Šarminės korozijos atsiradimo galimybė buvo nustatyta taikant pagreitintą šarminės korozijos nustatymo metodą, kuris buvo atliktas vadovaujantis Miuncheno technikos universiteto mokslininkų sukurtais rekomendacijomis. Pagal šias rekomendacijas buvo suformuotos prizmės formos ($10 \times 40 \times 160$ mm) bandiniai. Suformuoti bandiniai buvo apšlifuoti ir palikti 1 parą kietėti $80^\circ C$ temperatūros distiliuotame vandenyje. Paskui laikyti 14 parų $80^\circ C$ temperatūros 1 M NaOH tirpale. Pagal šį metodą betono bandinys, kurio išsiplėtimo deformacijos bus didesnės nei 1 mm/m, nėra atsparus šarminės korozijos ardomajam poveikiui. Eksperimentinių tyrimų metu pagreitinata šarminės korozijos nustatymo metodas buvo pritaikytas du kartus – po išformavimo ir po 1115 kietėjimo parų (**4.35 ir 4.36 paveikslėliai**).

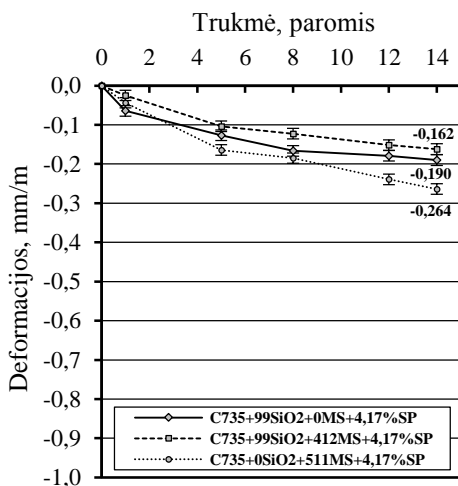
Pastebėta, jog po išformavimo taikant pagreitintą šarminės korozijos nustatymo metodą (**4.35 paveikslas**), didžiausios susitraukimo deformacijos ($-0,321$ mm/m) po 14 parų $80^\circ C$ temperatūros 1 M NaOH tirpale pastebėtos įprastiniame betono mišinyje ($C735+99SiO_2+0MS+4,17\%SP$), kuriame panaudotos silicio mikrodulkės. Tačiau

abiejuose betono mišiniuose, kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas ($C735+99SiO_2+412MS+4,17\%SP$ ir $C735+0SiO_2+511MS+4,17\%SP$), susitraukimo deformacijos buvo labai panašios ir apie 2,5 karto mažesnės nei esant standartinei betono mišinio sudėčiai ($-0,136$ mm/m).

Šis neįprastas faktas galėtų būti paaiškinamas nagrinėjant šarminės korozijos atlikimo metodiką. Prieš įdedant į $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros 1 M NaOH tirpalą, bandiniai buvo išlaikomi 1 parą $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros vandenyje. Šis laikas sutampa su bandinių terminio kietinimo laiku. Ankstesniuose eksperimentiniuose tyrimuose buvo nustatyta, jog betono mišiniuose, kuriuose panaudotas maltas stiklas, cemento hidratacijos procesas vyksta gerokai intensyviau nei standartiniame betone su silicio mikrodulkėmis. Kadangi cemento hidratacijos procesas įvyko intensyviau, mišiniuose, kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas, susitraukimo deformacijos buvo kur kas mažesnės nei standartiniame mišinyje, kuriame nebuvo malto stiklo. Po 1115 parų (3 metų) pakartotinai atlikus tą patį bandymą taip pat nustatyta, jog visi bandiniai toliau traukėsi, tai reiškia, jog vyko tolesnis džiūvimo procesas. Pastebėta, jog, laikant bandinius šarminėje aplinkoje, tai yra labai panašu, kaip ir taikant prailgintą terminio apdorojimo laiką. Siekiant įsitikinti, ar tai nekenkia sukietėjusio betono savybėms, atlikus šarminės korozijos bandymą buvo nustatytas bandinių gniuždymo stipris (**4.37 paveikslas**).

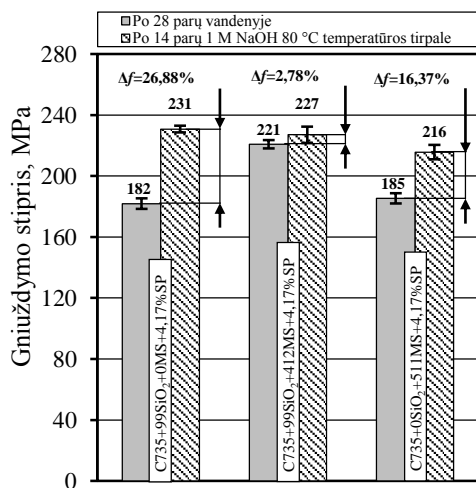


4.35 pav. Malto stiklo kiekio įtaka betono susitraukimo deformacijoms, taikant pagreintą šarminės korozijos nustatymo metodą (deformacijos pradėtos matuoti išformavus bandinius)

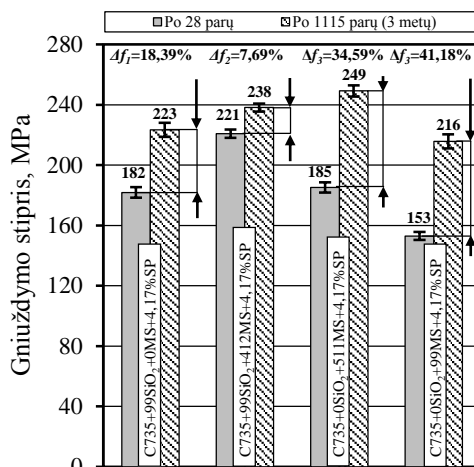


4.36 pav. Malto stiklo kiekio įtaka betono susitraukimo deformacijoms, taikant pagreintą šarminės korozijos nustatymo metodą (deformacijos pradėtos matuoti po 1115 parų)

Pastebėta, jog visų tirtų bandinių, kurie buvo laikomi $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros 1 M NaOH tirpale, gniuždymo stipris padidėjo (**4.37 paveikslas**). Didžiausias gniuždymo stiprio padidėjimas buvo pastebėtas esant įprastinei betono mišinio sudėčiai ($C735+99SiO_2+0MS+4,17\%SP$), kai panaudotos silicio mikrodulkės. Šiame betono mišinyje gniuždymo stipris padidėjo $26,88\%$, nuo 182 MPa iki 231 MPa . Mažiausias gniuždymo stiprio padidėjimas pastebėtas betono mišinyje ($C735+99SiO_2+412MS+4,17\%SP$), kuriame panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas. Šiame betone gniuždymo stipris padidėjo $2,78\%$, nuo 221 MPa iki 227 MPa .



4.37 pav. Betono gniuždymo stiprio pokytis prieš ir po pagreitinto šarminės korozijos nustatymo metodo



4.38 pav. Betono gniuždymo stiprio pokytis po 28 parų ir po 1115 parų

Šie rezultatai kaip tik patvirtina ankstesnę prielaidą, jog maltas stiklas cemento hidratacijos procesui yra kur kas efektyvesnis, kai panaudotos ir silicio mikrodulkės. Įdomu tai, jog po 14 parų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale gaunamos labai panašios mechaninės betono savybės, kaip ir termiškai apdorotų bandinių, kurie vėliau buvo išlaikyti 1115 parų 20 °C temperatūros vandenyje (**4.38 paveikslas**). Pagal gautus rezultatus galima teigti, jog, tiriant ypač stipraus betono savybes ir struktūrą, neigiama malto stiklo įtaka nepastebėta. Priešingai, maltas stiklas gali pakeisti brangesnį pucolaninį užpildą (silicio mikrodulkes) pigesniu (maltu stiklu) ir nepabloginti betono fizikinių ir mechaninių savybių. **4.1 lentelėje** pateikiamos rekomenduojamosios ypač stipraus betono mišinio sudėtys, kurios pasižymėjo geriausiomis fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis.

4.1 lentelė. Rekomenduojamosios ypač stipraus betono mišinio sudėtys

Komponentai	Sudėtis, pagal rišiklio kiekį		
	C735+99SiO ₂ +0MS	C735+99SiO ₂ +412MS	C735+0SiO ₂ +511MS
V/C	0,25		
Vanduo, kg/m ³	184		
Cementas, kg/m ³	735		
Silicio mikrodulkės, kg/m ³	99	99	–
Maltas kvarcinis smėlis, kg/m ³	412	–	–
Maltas stiklas kg/m ³	–	412	511
Kvarcinis smėlis (#0/0.5 mm), kg/m ³	962	962	962
Superplastiklis (SP), kg/m ³	30,65		

Pastaba: Rekomenduojami vandens ir superplastiklio kiekiai gali kiek skirtis, priklausomai nuo naudojamo cemento ar superplastiklio tipo ir pageidaujamos mišinio konsistencijos.

4.4. Ypač stipraus betono mišinių technologijos ruošimo ypatumai panaudojant pramoninę maišyklę

Ypač stipraus betono bandymai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universitete, padedant Tiltų ir specialiųjų statinių katedros specialistams. Maišyta pramonine planetarine maišykle HPGM 1125. Pagrindiniai maišyklės parametrai: tūris – 1125 litrai;

efektyvus maišymo tūris – 750 litrai; galia – 30 kW; maišyklės masė – 3800 kg. YSB mišinio sudėtis pateikta **4.2 lentelėje**.

4.2 lentelė. Rekomenduojama ypač stipraus betono mišinio sudėtis

Komponentai	Sudėtis, pagal rišiklio kiekį
	C735+99SiO ₂ +0MS
V/C	0,27
Vanduo, kg/m ³	199
Cementas, kg/m ³	735
Silicio mikrodulkės, kg/m ³	99
Maltas kvarcinis smėlis, kg/m ³	412
Maltas stiklas kg/m ³	–
Kvarcinis smėlis (#0/0.5 mm), kg/m ³	962
Superplastiklis (SP), kg/m ³	30,65
Plieninio pluošto kiekis, kg/m ³	80

*Gamybinių bandymų buvo parinkta betono sudėtis be malto stiklo, nes nebuvo galimybių pritaikyti terminio apdorojimo, kas labai sumažina malto stiklo naudojimo efektyvumą.

Atlikus eksperimentą buvo pastebėta, jog, naudojant pramoninę maišyklę HPGM 1125, neužteko įprastinio maišymo laiko (8 min), todėl maišymo trukmė buvo pakoreguota ir prailginta iki 12 min. (**4.3 lentelėje**). Atliekant gamybinius bandymus buvo parinkta betono sudėtis be malto stiklo, nes nebuvo galimybių pritaikyti terminio apdorojimo, kas labai sumažina malto stiklo naudojimo efektyvumą. Gaminiai buvo kietinami 28 paras patalpoje ~20 °C temperatūroje. Pagrindinės betono fizikinės ir mechaninės savybės pateiktos **4.4 lentelėje**. Savybės nustatytos naudojant cilindro formos bandinius ($d = 150$ mm ir $h = 300$ mm).

4.3 lentelė. Patikslinta YSB mišinio maišymo procedūra, naudojant pramoninę maišyklę

Laikas, sek.,	Maišymo procedūra
60	Sausųjų komponentų homogenizavimas
30	Supilamas visas vanduo ir 50 % superplastiklio
60	Mišinio homogenizavimas
240	Pauzė
30	Supilama 50 % likusio superplastiklio
300	100 s mišinio homogenizavimas, tada supilamas plieninis pluoštas ir dar 200 s mišinys homogenizuojamas

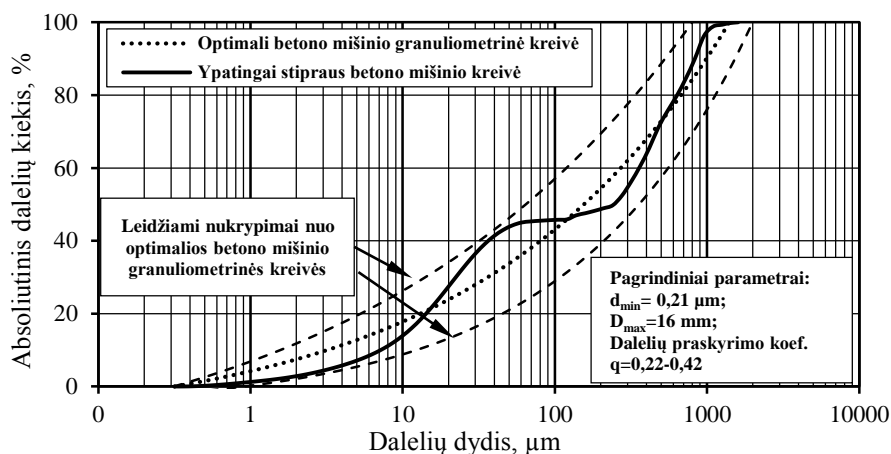
4.4 lentelė. YSB betono fizikinės ir mechaninės savybės

Betono mišinio pasklidimas, cm	30–33
Tankis, kg/m ³	2360–2410
Gniuždymo stipris po 28 parų, MPa (kietinant patalpoje ~20 °C temperatūroje)	115–120
Statinis tamprumo modulis, GPA	45–48

4.4.1. Rekomendacijos ypač stipraus betono gamybai

Rekomenduojamos betono mišinio sudėtys pateiktos **4.1 lentelėje**. Apibendrintos priklausomybės tarp V/R santykio ir gniuždymo stiprio pateiktos **4.39 paveiksle**. Priklausomybės galioja šiomis sąlygomis, kai medžiagų kiekiai: cemento – 735±50 kg/m³; silicio mikrodulkių – 99±10 kg/m³; malto stiklo – 512±50 kg/m³, maltas kvarcinis smėlis – 412±50 kg/m³, 0/1,6 mm frakcijos kvarcinis smėlis – 962±50 kg/m³. Rekomenduojama naudoti:

- CEM I 52,5 (N arba R) klasės portlandcementį, kuriame C_3A kiekis neviršytų 5 % (didesnis C_3A kiekis mažina įmaišų (superplastiklio) efektyvumą), o savitasis paviršius būtų 430,0–520,0 m²/kg.
- Naudojamų silicio mikrodulkių sudėtyje amorfinės struktūros silicio dioksido būtų ≥ 95 %.
- Malto stiklo savitasis paviršius turėtų kisti nuo 200,0 iki 350,0 m²/kg.
- Malto kvarcinio smėlio smulkumas turėtų kisti nuo 200,0 iki 3500 m²/kg. Malto kvarcinio smėlio ir 1,6 mm frakcijos kvarcinio smėlio rekomenduojami kiekiai nedaug gali būti pakeisti, tačiau mišinio granulimetrinė sudėtis neturėtų nukrypti nuo rekomenduojamosios (**3.39 paveikslas**).



4.39 pav. Rekomenduojama ypach stipraus betono mišinio granulimetrinė kreivė

- Patikslinta betono mišinio maišymo procedūra pateikta **4.3 lentelėje**. Bendra betono mišinio maišymo trukmė turėtų kisti nuo 8 min. iki 12 min (priklauso nuo maišyklės efektyvumo). Ilgesnis nei 12 min maišymas nėra rekomenduojamas, nes mišinio temperatūra viršys leistiną ribą.
- Betono mišinio dinaminė klampa turėtų būti mažesnė kaip 100 Pa·s.

4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

4.1. Amen (2011) matematinis modelis yra tinkamas ypač stipraus betono gniuždymo stipriui prognozuoti, kai betono mišinyje panaudotos silicio mikrodulkės ir maltas stiklas, o V/R santykis kinta nuo 0,20 iki 0,30. Gniuždymo stiprumo nuo V/R santykio priklausomybė nėra tiesinė, todėl šis modelis nėra tinkamas gniuždymo stipriui prognozuoti, kai V/R didesnis nei 0,30 arba mažesnis nei 0,20.

4.2. Mišiniuose, kuriuose vietoj silicio mikrodulkių buvo panaudotas maltas stiklas, sumažėja nuo 6 % iki 4 % suminis porų kiekis, padidėja sureagavusio cemento kiekis nuo 47 % iki 70 %, o gniuždymo stipris padidėja nuo 180 MPa iki 230 MPa.

4.3. Po 40 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale nustatyta, jog betonuose masės nuostoliai kito nuo 0,0034 kg/m² iki 0,0249 kg/m². Betono mišiniuose, kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas, masės nuostoliai buvo apie tris kartus mažesni, lyginant su sudėtimi, kai buvo panaudotos silicio mikrodulkės.

4.4. Atlikus 200 tūrinio šaldymo ir atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale, kurie atitinka apie 800 šaldymo ir atšildymo ciklų natūraliame vandenyje, pastebėta, kad vizualiai bandiniai mažai pakito, tačiau dėl atsiradusių mikrodefektų betono struktūroje gniuždomasis stiprumas sumažėjo. Atspariausi tūriniam šaldymo ir atšildymo bandymui buvo betonas su maltu stiklu.

4.5. Suprojektuotas ypač stipraus betono mišinys yra tinkamas naudoti gamybinėmis sąlygomis, tačiau bendra maišymo trukmė turėtų būti ilgesnė, nei nustatyta laboratorijoje.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Taikant kokybinę ir kiekybinę rentgenografinę, termografinę, ^{29}Si magnetinio branduolių rezonanso analizę nustatyta, kad:

1.1. silicio mikrodulkės gali sumažinti iki 23 % portlandcemenčio hidratacijos metu išsiskyrusio portlandito kiekį ir padidinti gniuždymo stiprį iki 20 %;

1.2. naudojant silicio mikrodulkes lieka daugiau kaip 50 % nesureagavusio klinkerio. Vietoj silicio mikrodulkių panaudojus maltą stiklą, nesureagavusio cemento kiekis gali būti sumažintas iki 25 %, o gniuždymo stipris padidintas iki 27 %;

1.3. 20 °C temperatūroje silicio mikrodulkių pucolaninis aktyvumas yra didesnis (iki trijų kartų) nei malto stiklo, tačiau taikant terminį apdorojimą (3+18+5) 80 °C temperatūroje malto stiklo pucolaninis efektyvumas padidėja, be to, maltas stiklas pradeda veikti kaip cemento hidratacijos greitiklis.

2. Sujungiant Brouwers ir Amen matematinius modelius, sudaryta skaičiavimo metodika, pagal kurią, įvertinant V/R santykį ir rišiklio hidratacijos laipsnį, galima prognozuoti cemento akmens struktūros parametrus (susidariusių hidratacijos produktų, nesureagavusio klinkerio, nesureagavusio vandens, susitraukimo dėl cheminių veiksnių ir kalcio hidrosilikatų tūrinės koncentracijas) bei sukietėjusio betono gniuždymo stiprį:

2.1. eksperimentiniais tyrimais gautas iki 7 % didesnis rišiklio hidratacijos laipsnis ir iki 5 % mažesnis nesureagavusio rišiklio kiekis lyginant su matematiniais skaičiavimais;

2.2. eksperimentiniais tyrimais gautas gniuždymo stipris yra iki 8 % mažesnis, lyginant su matematiniais skaičiavimais;

2.3. pateikta betono mišinio sudėties projektavimo metodika yra tinkama skaičiuoti 130–230 MPa gniuždymo stiprio betonams.

3. Nustatyta, kad maltas stiklas yra tinkamas priedas naudoti ypač stipriam betonui, nes efektyviau pagerina mišinio technologines savybes (mažina vandens poreikį), nesumažina sukietėjusio betono tankio ($\geq 2400 \text{ kg/m}^3$), padidina betono gniuždymo ir lenkimo stiprį (atitinkamai iki 230 MPa ir 25 MPa be plieninio armuojančio plaušo), efektyviau sumažina suminį betono poringumą (sumažėja nuo 6,0 % iki 3,8 %), padidina atsparumą šalčio poveikiui iki 7 kartų (po 40 šaldymo ir atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale: be malto stiklo – $0,0249 \text{ kg/m}^2$ ir su maltu stiklu – $0,0034 \text{ kg/m}^2$), nekeičia arba nedaug keičia galutines betono susitraukimo deformacijas.

4. Suprojektuotas ypač stipraus betono mišinys yra tinkamas naudoti gamybinėmis sąlygomis, tačiau bendra maišymo trukmė turėtų būti ilgesnė nei nustatyta laboratorijoje. Gamybinėmis sąlygomis paruošto betono gniuždymo stipris yra iki 12 % mažesnis, lyginant su matematiniais skaičiavimais.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Straipsniai žurnale:

1. **Abbas, S., Soliman, A.M., Nehdi, M.L.** (2015). *Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages*. Construction and Building Materials, Volume 75, 30, Pages 429–441.
2. **Aïtcin, P.C.** (2000). *Cements of yesterday and today – Concrete of tomorrow*. Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 9: 1349-1359.
3. **Amen, D.K.H.** (2011). *Degree of Hydration and Strength Development of Low Water to Cement Ratios in Silica Fume Cement System*. International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS, Vol: 11 No: 05, pp 10-15.
4. **Andreasen, A.H.M., Andersen, J.** (1930). *Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)*. Colloid & Polymer Science, Vol. 50 (3), pp. 217-228.
5. **Baltakys, K., Eisinas, A., Dizhbite, T., Jasina, L., Šiaučiūnas, R., Kitrys, S.** (2011). *The influence of hydrothermal synthesis conditions on gyrolite texture and specific surface area*. Materials and structures. Dordrecht: Springer. ISSN 1359-5997. 2011, Vol. 44, no. 9, p. 1687-1701.
6. **Beaudoin, J.J., Raki, L., Alizadeh, R.** (2009). *A ^{29}Si MAS NMR study of modified C–S–H nanostructures*. Cement & Concrete Composites, 31, 585–590.
7. **Bhat, P.A., Debnath, N.C.** (2011). *Theoretical and experimental study of structures and properties of cement paste: The nanostructural aspects of C–S–H*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, Volume 72, Issue 8, Pages 920–933.
8. **Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aïtcin, P.C.** (1997). *Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes*. ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 4: 286-290.
9. **Bouzabata, H., Multon, S., Sellier, A., Houari, H.** (2012). *Effects of restraint on expansion due to delayed ettringite formation*. Cement and Concrete Research, Volume 42, Issue 7, Pages 1024–1031.
10. **Brouwers, H.J.H.** (2004). *The work of Powers and Brownyard revisited: Part 1*. Cement and Concrete Research, Volume 34, 1697–1716.
11. **Brouwers, H.J.H.** (2005). *The work of Powers and Brownyard revisited: Part 2*. Cement and Concrete Research, Volume 35, 1922 – 1936.
12. **Brouwers, H.J.H.** (2006). *Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings*. Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. Vol. 74 (3), pp. 031309- 031309-14.
13. **Cartuxo, F., Brito, J.D., Evangelista, L., Jiménez, J.R., Ledesma, E.F.** (2015). *Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer*. Construction and Building Materials, Volume 89, Issue 1. Pages 36–47.
14. **Castellote, M., Llorente, I., Andrade, C., Alonso C.** (2003). *Accelerated leaching of ultra high performance concretes by applications of electrical fields to simulate their natural degradation*. Materials and Structures, Vol. 36: 81-90.
15. **Cong, S.K., Xing, F.** (2012). *The Effect of Recycled Glass Powder and Reject Fly Ash on the Mechanical Properties of Fibre-Reinforced Ultrahigh Performance*

Concrete. Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2012, Article ID 263243, 8 pages.

16. **Corinaldesi V, Gnappi G, Moriconi G, Montenero A.** (2005). *Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars*. Waste Manage, Volume 25:197–201.
17. **Dhir, R.K., Dyer, T.D., Tang, M.C.** (2009). *Alkali-silica reaction in concrete containing glass*. Materials and Structures, Volume 42, Issue 10, pp. 1451-1462.
18. **Du, H., Tan, K.H.** (2014). *Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars*. Construction and Building Materials, Volume 66, Issue 15, Pages 275–285.
19. **Dugat, J., Roux, N., Bernier, G.** (1996). *Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes*. Materials and Structures, Vol. 29: 233-240.
20. **Eneina, S.A.A.E., Amin, M.S., Hosiny, F.I.E., Hanafi, S., ElSokkary, T.M., Hazem, M.M.** (2014). *Pozzolanic and hydraulic activity of nano-metakaolin*. HBRC Journal, Volume 10, Issue 1, Pages 64–72.
21. **Feldman R. F., Sereda P. J.** (1968). *A model for hydrated portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties*. Materials and Structures, 1(6): 509-520.
22. **Ferrari, L., Kaufmann, J., Winnefeld, F., Plank, J.** (2010). *Interaction of cement model systems with superplasticizers investigated by atomic force microscopy, zeta potential, and adsorption measurements*. Journal of Colloid and Interface Science, 347, 15–24.
23. **Florea, M.V.A., Brouwers, H.J.H.** (2013). *Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use*. Cement and Concrete Research, Volume 52, Pages 11–21.
24. **Fuller, W.B., Thompson, S.E.** (1907). *The laws of proportioning concrete*. ASCE J. Transport., Vol. 59, pp. 67-143.
25. **Furnas C. C.** (1931). *Grading the aggregates I – mathematical relations for beds of broken solids of maximum density*. Ind. & Eng. Chemistry, 23 (9), pp 1052–1058.
26. **Gao, R., Liu, Z.-M., Zhang, L.Q., Stroeve, P.** (2006). *Static Properties of Reactive Powder Concrete Beams*. Key Engineering Materials, Vol. 302-303: 521-527.
27. **Graybeal, B., Tanesi, J.** (2007). *Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 19(10), pp. 848-854.
28. **Hegazy, B.E.D.E., Fouad, H.A., Hassanain, A.M.** (2012). *Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making*. Advances in Environmental Research, Vol. 1, No. 1, 83-96.
29. **Heinz, D., Gerlicher, T., Urbonas, L.** (2013). *Ultra-High Performance Concrete Mixes with Reduced Portland Cement Content*. Journal of sustainable architecture and civil engineering (darnioji architektūra ir statyba), No. 3(4), pp 47-51.
30. **Hongjian, D., Hwee, T.K.** (2013). *Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods*. Cement Concr Compos, 2013, 35:118–26.
31. **Hunger, M. Brouwers, H.J.H.** (2009). *Flow analysis of water-powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor*. Cement & Concrete Composites, Vol. 31, pp. 39-59.
32. **Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Yiğiter, H., Aydın, S., Türkel, S.** (2010). *Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground*

- granulated blast furnace slag*. Cement and Concrete Composites, Volume 32, Issue 8, Pages 639–648.
33. **Ichikawa, T.** (2009). *Alkali–silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect*. Cement and Concrete Research, 39, 716–726.
 34. **Ichikawa, T., Miura M.** (2007). *Modified model of alkali–silica reaction*. Cement and Concrete, 37:1291–1297.
 35. **Yoo, D.Y., Park, J.J., Kim, S.W., Yoo, Y.S.** (2013). *Effect of shrinkage reducing admixture on tensile and flexural behaviors of UHPFRC considering fiber distribution characteristics*. Construction and Building Materials, Volume 41, Pages 427–438.
 36. **Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H.** (2014). *Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount*. Construction and Building Materials, Volume 65, 29, Pages 140–150.
 37. **Jabri, K.A., Shoukry, H.** (2014). *Use of nano-structured waste materials for improving mechanical, physical and structural properties of cement mortar*. Construction and Building Materials, Volume 73, 30, Pages 636–644.
 38. **Jacobsen, S. Sellevold, E.J.** (1996). *Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw*. Cement and Concrete Research, 26(1), 55-62.
 39. **Jennings, H.M. Bullard, J.W.** (2011). *From electrons to infrastructure: Engineering concrete from the bottom up*. Cement and Concrete Research, 41, 727–735.
 40. **Jennings, H.M., Thomas, J.J., Gevrenov, J.S., Constantinides, G., Ulm, F.J.** (2007). *A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste*. Cement and Concrete Research, 37, 329–336.
 41. **Juengera, M.C.G., Ostertag, C.P.** (2004). *Alkali–silica reactivity of large silica fume-derived particles*. Cement and Concrete Research, 2004, 34:1389–402.
 42. **Kennouche, .S., Zerizer, .A., Benmounah, .A., Hami, .B., Mahdad, .M., Benouali, .H., Bedjou .S.** (2013). *Formulation and characterization of self-compacting concrete with silica fume*. Journal of Engineering and Technology Research, Vol. 5(5), pp. 160-169.
 43. **Kou, S.C., Xing, F.** (2012). *The Effect of Recycled Glass Powder and Reject Fly Ash on the Mechanical Properties of Fibre-Reinforced Ultrahigh Performance Concrete*. Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2012, 8 pages.
 44. **Land, G., Stephan, D.** (2012). *The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement*. Journal of Materials Science, Volume 47, Issue 2, pp. 1011-1017.
 45. **Le, H.T., Siewert, K., Ludwig, H.M.** (2015). *Alkali silica reaction in mortar formulated from self-compacting high performance concrete containing rice husk ash*. Construction and Building Materials, Volume 88, 30 July Pages 10–19.
 46. **Lee, M.G., Chiu, C.T., Wang, Y.C.** (2005). *The study of bond strength and bond durability of reactive powder concrete*. Journal of ASTM International, 2(7), 10 pages.
 47. **Long, L.K., Fu, W.N., Lueng, S.J., Chin, L.T., Chau, L.** (2008). *Elucidating the hydration properties of paste containing thin film transistor, liquid crystal display waste glass*. J Hazard Mater, 159, (2-3):471–475.

48. **Ma, J., Schneider, H.** (2002). *Properties of Ultra-High-Performance Concrete*. Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER), No. 7: 25-32.
49. **Maroliya, M. K.** (2012). *A Qualitative Study of Reactive Powder Concrete using X-Ray Diffraction Technique*. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), Volume 2, Issue 9, pp. 12-16.
50. **Morsy, M.S.** (2005). *Effect of temperature on hydration kinetics and stability of hydration phases of metakaolin–lime sludge–silica fume system*. *Ceramics – Silikáty*, 49 (4) 225-229.
51. **Nassar, R.U.D., Soroushian, P.** (2012). *Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement*. *Construction and Building Materials*, 29:368–377.
52. **Nematollahi, B., Saifulnaz, R., Mohd, M. R., Jaafar, S., Voo, Y. L.** (2012). *A review on ultra high performance ‘ductile’ concrete (UHPdC) technology*. *International journal of civil and structural engineering*, Volume 2, No 3, pp. 1003-1018.
53. **Oertel, T., Hutter, F., Ricarda, T., Helbig, U., Sext, G.** (2013). *Primary particle size and agglomerate size effects of amorphous silica in ultra-high performance concrete*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 37, Pages 61–67.
54. **Plank, J., Hirsch, C.** (2007). *Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption*. *Cement and Concrete Research*, 37, 537–542.
55. **Plank, J., Schroefl, C., Gruber, M., Lesti, M., Sieber, R.** (2009). *Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The importance of PCE compatibility with Silica Fume*. *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 7, no.1, 5-12.
56. **Powers, T.C., Brownyard, T.L.** (1946). *Studies on the physical properties of hardened Portland cement paste*. Bulletin 22 of the Portland Cement Association, volume 43, Issue 9, pages 249-336.
57. **Puertas, F., Santos, H., Palacios, M., Ramirez, S.M.** (2005). *Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes*. *Advances in Cement Research*, 17, No. 2, April, 77–89.
58. **R. Yu , Spiesz, P., Brouwers, H.J.H.** (2014). *Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)*. *Cement and Concrete Research*, 56, 29–39.
59. **Reddy, T.C.S., Elumalai, J.K.** (2014). *Study of macro mechanical properties of ultra high strength concrete using quartz sand and silica fume*. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, Volume: 03 Issue: 09, 391-396.
60. **Richard P., Cheyrezy, M.** (1995). *Composition of reactive powder concretes*. *Cement and Concrete Research*, 25(7) 1501-1511.
61. **Richardson, I.G.** (2004). *Tobermorite/jennite- and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, h-dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin, or silica fume*. *Cement and Concrete Research*, 34, 1733–1777.
62. **Rong, Z., Sun, W., Xiao, H., Jiang, G.** (2015). *Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 56, Pages 25–31.

63. **Roux, N., Andrade, C., Sanjuan, M.A.** (1996). *Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes*. Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 1-6.
64. **Safi, B., Benmounah, A., Saidi, M.** (2011). *Rheology and zeta potential of cement pastes containing calcined silt and ground granulated blast-furnace slag*. Materiales de Construcción, Vol 61, No 303, 353-370.
65. **Samiei, R.R., Daniotti, B., Pelosato, R., Dotelli, G.** (2015). *Properties of cement–lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials, Volume 84, 1, Pages 84–94.
66. **Schmidt, M., Fehling, E., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R.** (2003). *Ultra-High Performance Concrete: Perspective for the Precast Concrete Industry*. Concrete Precasting Plant and Technology, Vol. 69, No. 3: 16-29.
67. **Schmidt, M., Fehling, E., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R.** (2003). *Ultra-High Performance Concrete: Perspective for the Precast Concrete Industry*. Concrete Precasting Plant and Technology, Vol. 69, No. 3: 16-29.
68. **Schröfl, C., Gruber, M., Plank, J.** (2012). *Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC)*. Cement and Concrete Research, 42, 1401–1408.
69. **Schwanda, F.** (1966). *Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für Spannbetonbau*. Zement und Beton, Vol. 37, pp. 8-17.
70. **Shafaatian, S.M.H., Alireza, A., Hamed, M., Farshad, R.** (2013). *Howdoes fly ash mitigate alkali–silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)*. Cement and Concrete Composites, 37:143–53.
71. **Shi, C., Zheng, K.** (2007). *A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete*. Resources, Conservation and Recycling 52, pp.234–247.
72. **Slamečka, T., Škvára, F.** (2002). *The effect of water ratio on microstructure and composition of the hydration products of portland cement pastes*. Ceramics – Silikáty, 46 (4) 152-158.
73. **Sobolev, K., Amirjanov, A.** (2007). *The simulation of particulate materials packing using a particle suspension model*. Advanced Powder Technology, Volume 18, Issue 3, Pages 261–271.
74. **Stark, J.** (2011). *Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis*. Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 7, Pages 666–678.
75. **Talero, R., Pedrajas, C., Rahhal, V.** (2013). *Performance of Fresh Portland Cement Pastes – Determination of Some Specific Rheological Parameters*. Rheology - New Concepts, Applications and Methods, Associate Prof. Rajkumar Durairaj (Ed.), ISBN: 978-953-51-0953-2, InTech, 57-80.
76. **Tang, S.W., Zhu, H.G., Li, Z.J., Chen, E., Shao, H.Y.** (2015). *Hydration stage identification and phase transformation of calcium sulfoaluminate cement at early age*. Construction and Building Materials, Volume 75, 30, Pages 11–18.
77. **Thomas, J.J., Jennings, H.M., Allen, A.J.** (2010). *Relationships between Composition and Density of Tobermorite, Jennite, and Nanoscale CaO-SiO₂-H₂O*. The Journal of Physical Chemistry C, 114, 7594–7601.
78. **Velosa, A.L., Cachim, P.B.** (2009). *Hydraulic-lime based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions*. Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 5, Pages 2107–2111.

79. **Vernet, C.P.** (2004). *Ultra-Durable Concretes: Structure at the Micro-and Nanoscale*. MRS Bulletin, Vol. 29, No. 5: 324-327.
80. **Westman, A.E.R., Hugill, H.R.** (1930). *The packing of particles*. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 13 (10), pp. 767-779.
81. **Zerbino, R., Giaccio, G., Batic, O.R., Isaia, G.C.** (2012). *Alkali-silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash*. Construction and Building Materials, 36:796–806.
82. **Zheng, J., Johnson, P.F. and Reed, J.S.** (1990). *Improved Equation of the Continuous Particle Size Distribution for Dense Packing*. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 73 (5), pp. 1392-1398.

Publikuoti konferencijų straipsniai:

1. **Acker, P., Behloul, M.** (2004). *Ductal® Technology: A Large Spectrum of Properties, Ultra High Performance Concrete*. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, Sept. 13-15: 11-23.
2. **Bache, H.H.** (1981). *Densified cement/Ultra fine particle based materials*. Presented at the Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, June 10 - 12, 1981, Ottawa, Ontario, Canada Denmark, pp.35.
3. **Droll, K.** (2003). *Einfluss von Zusatzstoffen auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften von UHFB*. Ultrahochfester Beton, Bauwerk Verlag, Berlin, S.25-44.
4. **Droll, K.** (2004). *Influence of additions on ultra high performance concretes – grain size optimisation*. Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel, Germany, Sept. 13-15: 285-301.
5. **Edwin, R., Dunstan J. P.E.** (2011). *How Does Pozzolanic Reaction Make Concrete „Green“?*. World of Coal Ash (WOCA) Conference – May 9-12, Denver, CO, USA. 14 pages.
6. **Fehling, E., Lorenz, P., Leutbecher, T.** (2012). *Experimental Investigations On Anchorage of Rebars in UHPC*. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high Performance construction Materials, Kassel, March 7-9, pp. 523-540.
7. **Geisenhaunsluke, C., Schmidt, M.** (2004). *Methods for modeling and Calculation of high density Packing for Cement and Fillers in UHPC*. Ultra high performance (UHPC), International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel university press, Kassel, Proc. pp 303-312.
8. **Heinz, D., Urbonas, L., Gerlicher, T.** (2012). *Effect of Heat Treatment Method on the Properties of UHPC*. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high Performance construction Materials, Kassel, March 7-9, pp. 283-290.
9. **Herold, G., Müller, H.S.** (2004). *Measurement of porosity of Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete*. *Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, Kassel, Germany, Sept. 13-15: 685-694.
10. **Idir, R., Cyr, M., Tagnit, H.A.** (2009). *Use of waste glass as powder and aggregate in cement-based materials*. 1st international conference on sustainable built

- environnement infrastructures in developing countries ENSET Oran (Algeria); October 12–14, p. 109–16.
11. **Ye, G., Breugel, K.V.** (2007). *Potential use of hygroscopic cement hydration model for self-healing of microcracks in cementitious materials*. Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, 18-20 April, Noordwijk aan Zee, The Netherlands pp 1-8.
 12. **Jungwirth, J., Muttoni, A.** (2004). Structural Behavior of Tension Members in Ultra High Performance Concrete. *International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, 3 pages.
 13. **Kowald, T.** (2004). *Influence of surface modified Carbon Nanotubes on Ultra-High Performance Concrete*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany, pp 195-202.
 14. **Lopez, J.A., Camacho, E., Ros, P.S., Gregori, J.N.** (2012). Structural Design and Preliminary Calculations of UHPFRC Truss Footbridge. *Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high Performance construction Materials*, Kassel, March 7-9, pp. 897-904.
 15. **Möser, B., Pfeifer, C., Stark, J.** (2009). *Durability and microstructural development during hydration in Ultra-High Performance Concrete*. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds) © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3, pp. 87-88.
 16. **Naaman, A.E., Wille, K.** (2012). *The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five Decades of Progress*. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high Performance construction Materials, Kassel, March 7-9, pp. 3-15.
 17. **Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S., Koh, K.T.** (2012). *Effect of adding micro fibers on the pullout behavior of high strength steel fibers in UHPC matrix*. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high Performance construction Materials, Kassel, March 7-9, pp. 541-548.
 18. **Rebentrost, M., Wight, G.** (2008). *Experience and Applications of Ultra-high Performance Concrete*. BE2008 – Encontro Nacional Betão Estrutural 2008, Guimarães – 5, 6, 7 de Novembro, pp.1-10.
 19. **Resplendino, J.** (2012). *State of the art of design and construction of UHPC structures in France*. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high Performance construction Materials, Kassel, March 7-9, pp 27-41.
 20. **Schachinger, I., Hilbig, H., Stengel, T.** (2008). *Effect of Curing Temperature at an Early Age on the Long Term Strength Development of UHPC*. 2 International Symposium on UHPC., Kassel (Germany), March 05-07, pp. 205-212.
 21. **Schmidt, M.** (2006). *Von der Nanotechnologie zum Ultra-Hochfesten Beton*. Ibausil, Weimar, Tagungsband S. 2-1405-2-1416. Pp. 98-110.
 22. **Schmidt, M.** (2007). *Von der Nanotechnologie zum Ultra-Hochfesten Beton*. Ultra high Performance concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Heft 7, p.98-110.

23. **Schmidt, M., Fehling, E.** (2005). *Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe*. 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength and High-Performance- Concrete, ACI Washington, SP. 228-4, pp. 51-78.
24. **Shayan, A.** (2002). *Value-added Utilisation of Waste Glass in Concrete*. IABSE SYMPOSIUM, Melbourne, 2002,.11 pages.
25. **Sobolev, K., Flores, I., Hermosillo, R., Martínez, L.M.T.** (2006). *Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites*. Proceedings of ACI Session on "Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives, November 7, Denver, USA, Volume, 254, 93-120.
26. **Šeputytė, J., Sinica, M.** (2013). *Pūsto stiklo granuliy poveikis fizikinėms cementinio, kompozito savybėms*. 16-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija Proceedings of the 16th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“, p. 3-8.
27. **Tuan, N.V., Ye, G., Breugel, K.V.** (2012). *Mitigation of early age shrinkage of Ultra High Performance Concrete by using Rice Hush Ash*. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high Performance construction Materials, Kassel, March 7-9, pp. 341-348.

Normatyviniai dokumentai, standartai:

1. LST 1428.10:1996. *Betonas. Bandymo metodai. Neardomieji bandymai. Ultragarso impulso greičio nustatymas*.
2. LST EN 12390-1:2012. *Sukietėjusio betono bandymai. 1 dalis. Pavidalas, matmenys ir kiti bandinių bei liejimo formų reikalavimai*.
3. LST EN 12390-4:2003. *Betono bandymas. 4 dalis. Stipris gniuždant. Bandymo mašinų techniniai reikalavimai*.
4. LST EN 12390-5:2009/P:2011. *Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris*.
5. LST EN 12617-4:2003. *Betoninių konstrukcijų apsauginiai ir remontiniai produktai bei sistemos. Bandymo metodai. 4 dalis. Susitraukimo ir išsiplėtimo nustatymas*.
6. LST EN 12808-4:2009/AC:2011. *Plytelių glaistai. 4 dalis. Susitraukimo nustatymas*.
7. LST EN 1338:2003/AC:2006. *Betoninės grindinio trinkelės. Reikalavimai ir bandymo metodai*.
8. LST EN 1367-4:2008. *Užpildų šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams nustatymo metodai. 4 dalis. Susitraukimo džiūstant nustatymas*.
9. LST EN 14146:2004. *Gamtinio akmens bandymo metodai. Dinaminio tamprumo modulio nustatymas (matuojant pagrindinį rezonanso dažnį)*.
10. LST EN 196-6:2010. *Cemento bandymų metodai. 6 dalis. Smulkumo nustatymas*.
11. LST EN 196-9:2010. *Cemento bandymų metodai. 9 dalis. Hidratacijos šiluma. Pusiau adiabatinis metodas*.
12. LST EN 206:2014/P:2014. *Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis*.
13. LST L 1428.17:2005. *Betonas. Bandymo metodai. Atsparumo šalčiui nustatymas*

Knygos, monografijos, disertacijos, magistriniai darbai:

1. **Association Française de Génie Civil.** (2002). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances, Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes. AFGC Groupe de travail BFUP, Recommandations provisoires, Interim Recommendations*, Janvier, 98 pages.
2. **Balandis, A., Kaminsas, R., Vaickelionis, G.** (2006). Statybinių medžiagų chemija. II dalis. Neorganinių rišamųjų medžiagų chemija. Kaunas, Technologija, 87 puslapiai.
3. **Concrete Committe, Japan Society of Civil Engineers.** (2008). *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)*. Concrete Engineering Series 82, 113 pages.
4. **Funk, J.E. and Dinger, D.R.** (1994). Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions - Applied to Ceramic Manufacturing. *Boston: Kluwer Academic Publishers*, 791 pages.
5. **Graybeal, B.** (2006). Material property characterization of ultra-high performance concrete. Rep. No. FHWA-HRT-06-103, *Federal Highway Administration*, Washington, D.C, 176 pages.
6. **Hewlett, P.** (2004). *Lea's Chemistry of cement and concrete: fourth edition*. Elsevier Science & Technology Books, January, ISBN: 0750662565, 1092 pages.
7. **König, G., Viet T.N., Zink, M.** (2001). *Hochleistungsbeton, Bemessung, Herstellung und Anwendung*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin; seiten 417.
8. **Malakauskas, M.** (1964). *Betono su pakartotinai maltu cementu stiprumas ir deformacijos*. Daktaro disertacija. Technikos mokslai. Kaunas: Kauno politechnikos institutas, 224 p.
9. **Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D.** (2003). *Concrete 2nd Edition*. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 644 pages.
10. **Skripkiūnas, G.** (2007). *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*. Kaunas, Vitae Litera, 334 psl.
11. **Šerelis, E.** (2011). *Ypač stipraus betono tyrimai*. Magistro baigiamasis darbas. Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02 T). Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 122 p.
12. **Taylor, H.F.W.** (1997). *Cement chemistry. 2nd edition*. USA: American Society of Civil Engineers, Publications Sales Department, 345 East 47th Street, New York, NY 10017-2398, ISBN: 0 7277 2592 0, 480 pages.
13. **Taylor, P.C.** (2014). *Curing Concrete*. CRC Press, Taylor and Francis Group, International Standard Book Number-13: 978-0-203-86613-9, 214 pages.
14. **Vaitkevičius, V.** (2002). *Stipriojo betono struktūros ir gamybos technologiniai tyrimai*. Daktaro disertacija. Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02 T). Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 119 p.
15. **Vogt, C.** (2010). *Ultrafine particles in concrete. Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design*. School of Architecture and the Built Environment, Division of Concrete Structures, Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm, Sweden, Doctoral Thesis, 177 pages.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą (IF>0.2AIF)

1. Vaitkevičius, Vitoldas; Šerelis, Evaldas; Hilbig, Harald. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete // Construction and building materials. Oxford : Elsevier Science. ISSN 09500618.2014, Vol. 68, p. 102-109. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.101. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [IF:2,265, AIF: 2,249 (E, 2013)]. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 0.667; Persk. indėlis: 0.333]

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą (IF≤0.2AIF)

1. Vaitkevičius, Vitoldas; Šerelis, Evaldas; Rudžionis, Žymantas; Vaičiukynienė, Danutė. Nondestructive test methods application for structure analysis of ultrahigh performance concrete after deterioration of cyclic saltscaling//Mechanika / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslų akademija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Kaunas : KTU. ISSN 13921207. 2014, Vol. 20, no. 2, p. 213-220. DOI: 0.5755/j01.mech.20.2.6948. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Compendex; Academic Search Complete; FLUIDEX;Scopus]. [IF: 0,336, AIF: 1,739 (E, 2013)]. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 0.75; Persk. indėlis: 0.25]

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, neturinčiuose citavimo indeksą

1. Vaitkevičius, Vitoldas; Šerelis, Evaldas; Rudžionis, Žymantas. Nondestructive testing of ultrahigh Performance concrete to evaluate freezethaw resistance // Mechanika / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslų akademija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Kaunas : KTU. ISSN 13921207. 2012, T. 18, nr. 2, p. 164-169. DOI: org/10.5755/j01.mech.18.2.1565. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Compendex; Academic Search Complete; FLUIDEX; Scopus]. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 0.333]

Kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose

1. Šerelis, Evaldas; Vaitkevičius, Vitoldas; Kerševičius, Vidas; Deligia, Mariangela. Influence of water to cement ratio with different amount of binder on properties of ultrahigh performance concrete // Journal of sustainable architecture and civil engineering = Darnioji architektūra ir statyba / Kaunas University of Technology. Kaunas : Technologija. ISSN 20299990. 2015, Vol. 10, no. 1, p. 78-86. DOI: 10.5755/j01.sace.10.1.7166. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 0.25]
2. Vaitkevičius, Vitoldas; Šerelis, Evaldas; Lygutaitė, Raminta. Production waste of granite rubble utilisation in ultra high performance concrete // Journal of sustainable architecture and civil engineering = Darnioji architektūra ir statyba / Kaunas University of Technology. Kaunas : Technologija. ISSN 20299990. 2013, Nr. 2(3), p. 5460. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 0.667; Persk. indėlis: 0.333]

Konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai

1. Šerelis, Evaldas; Vaitkevičius, Vitoldas. Nondestructive test methods applicability on structure analysis of ultrahigh performance concrete after cyclic freeze damage deterioration // ECNDT 2014 [elektroninis išteklius] : 11th European conference on nondestructive testing, October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic / Czech Society for NDT and European Federation for NDT Brno : Brno University of Technology, 2014, ISBN 9788021450196. p. [110]. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 0.5]
2. Šerelis, Evaldas; Vaitkevičius, Vitoldas. Influence of glass powder on ultrahigh performance concrete // Chemistry and chemical technology : proceedings of the international conference, 25 April, 2014 / Kaunas University of Technology. Kaunas : Technologija, 2014. ISSN 23515643. 2014, p. 131-135. [M.kr. 03P]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 0.5]

Periodiniuose leidiniuose ir vienkartinuose straipsnių rinkiniuose ir kt. paskelbti straipsniai

1. Vaitkevičius, Vitoldas; Šerelis, Evaldas. Influence of silica fume on ultrahigh performance concrete // World Academy of Science, Engineering and Technology : International journal of civil, architectural science and engineering. Zurich : WASET. ISSN 2010376X. 2014, Vol. 8, no. 1, p. 37-42. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 0.5]

KITOS PUBLIKACIJOS

1. Lazauskas, Mantas; Šerelis, Evaldas. Intensyvios ir vibro maišyklių įtaka ypač stipraus betono savybėms // Statyba ir architektūra : jaunųjų mokslininkų konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Kaunas : Technologija. ISSN 23450959. 2013, p. 36-42. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 0.5]
2. Lygutaitė, Raminta; Šerelis, Evaldas. Modernios statybinės medžiagos // Statyba ir architektūra : jaunųjų mokslininkų konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Kaunas : Technologija, 2011, ISBN 9786090202555. p. 53-61. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 0.5]
3. Šerelis, Evaldas; Vaitkevičius, Vitoldas; Lygutaitė, Raminta. Racionaliausias ypač stipraus betono mišinio sudėties parinkimas, taikant artumo idėiam taškui metodą // Statyba ir architektūra : jaunųjų mokslininkų konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Kaunas : Technologija, 2011, ISBN 9786090202555. p. 85-98. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 0.667; Persk. indėlis: 0.333]

SL344. 2016-02-22, 16,5 leidyb. apsk. I. Tiražas 10 egz. Užsakymas 84.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas