



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

**3D spausdinimo technologijų taikymo statybos produktų
gamyboje analizė**

Baigiamasis magistro projektas

Jūratė Jakšaitė
Projekto autorė

Prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius
Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

3D spausdinimo technologijų taikymo statybos produktų gamyboje analizė

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Jūratė Jakštaitė

Projekto autorė

Prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius

Vadovas

Doc. dr. Ernestas Ivanauskas

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir Architektūros fakultetas

Jūratė Jakštaitė

3D spausdinimo technologijų taikymo statybos produktų gamyboje analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Jūratės Jakštaitės, baigiamasis projektas tema „3D spausdinimo technologijų taikymo statybos produktų gamyboje analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Turinys

Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė	12
1.1. 3D betono spausdinimo apžvalga.....	12
1.2. 3D betono spausdinimo privalumai	13
1.3. 3D betono spausdinimo universalumas ir technologija	14
1.4. Techninė ir programinė 3D spausdintuvo realizacija.....	16
1.4.1. 3D betono spausdintuvų varikliai	16
1.4.2. 3D betono spausdintuvų dalys	17
1.4.3. X/Y/Z judėjimo ašys.....	18
1.4.4. Grandinių ir skriemulių sistema.....	18
1.4.5. Srieginės ašis	19
1.4.6. 3D betono spausdintuvo valdiklis.....	20
1.4.7. Programinė įranga.....	21
1.4.8. Valdymo programa	21
1.5. Rišamosios medžiagos 3D spausdinimo technologijai	22
1.6. 3D betono stiprinimo būdas su armatūra ar fibromis.....	23
1.7. 3D betono stiprinimo būdas termiškai apdorojant pluoštą.....	24
1.8. 3D spausdinimas specialiu mišiniu	27
1.9. Ultragarso poveikis rišimosi procesui	28
2. Tyrimų metodika	29
2.1. Reglamentavimas	29
2.2. Tyrimo metodai	30
Hidratacijos procesų tyrimas	30
Gniuždymo stiprio nustatymas	31
2.3. Medžiagos naudotos eksperimente	35
3. Eksperimentai, bandymai ir rezultatai	37
Išvados	51
Literatūros sąrašas	52
Priedai.....	56

Paveikslų sąrašas

1 pav. Reikšmingi betono spausdinimo pavyzdžiai a) „Counter crafting“, JAV, b) Loughborough universitetas, J.K., c) Winsun, Kinija d) Xtree, Prancūzija, e) Apis-cor, Rusija, f) „Mini-builder“, Ispanija, g) Pirmasis pasaulyje 3D spausdintas biuras, Dubajus, h) „ICON“, Teksasas.....	13
2 pav. 3D spausdinimo procesas statybų aikštelėje.....	14
3 pav. Sienos fragmentas spausdinamas 3D betono spausdintuvu.....	15
4 pav. 3D spausdinimo sąrankos schema: 0. sistema; 1. roboto valdiklis; 2. spausdinimo valdiklis; 3. robotų rankos; 4. spausdinimo galvutė; 5. pagreitinimo agentas; 6. siurblys pagreičio įgyti; 7. peristaltinis siurblys mišiniui; 8. mišinio maišytuvas; 9. 3D spausdintas objektas. [2].....	15
5 pav. 3D betono spausdintuvo valdymo antgaliai: 1. pasyvus valdymo antgalis, 2. aktyvus valdymo antgalis.....	16
6 pav. Ašių išsidėstymas spausdintuvo prototipe.....	18
7 pav. Grandininė pavara.....	19
8 pav. Žingsnių variklio sujungimas su srieginėmis ašimis.....	20
9 pav. GF/geopolymerinio mišinio lenkimo savybės su fibromis (a) 3 mm (b) 6 mm (c) 8 mm ilgių ir (d) gniuždymo ir tempimo savybės su 3 mm GF. (Rezultatai gauti po 28 parų).....	24
10 pav. Elektroninio mikroskopu spinduliuote (Fe-SEM) gautas vaizdas (a) padengtos geopolimerinės matricos (b) 6 mm GF / geopolimerinės matricos lūžio paviršiaus.....	24
11 pav. a) 3D spausdintuvu spausdinti pluošto bandiniai, atliekamas 3-jų taškų lenkimo bandymas (matmenys 6-12 mm × 60 mm), nuotrauka. (b) Pluošto pasiskirstymo spausdinimo metu schema. c) Nuotrauka, kurioje yra lygiaverčių armatūros pluoštų ir gautų ESEM mikroskopu, kurie rodo pluošto kryptį (statmenai ir lygiagrečiai bandinio lūžio paviršiui).	25
12 pav. Lenkimo bandymo pavyzdžiai. Spausdintų bandinių „takelių“ vaizdas iš viršaus (a) lygiagrečiai išspausdintas „bandinys A“. b) „bandinys B“, 2 skirtingi sluoksniai (sukasi 90 ° vienas kitam). Trisluoksnių gniuždomojo stiprumo bandymams naudojamų pavyzdžių spausdinimo takelių viršutinis vaizdas (c) yra lygiagrečiai išspausdintas, vadinamas „bandinys C“ ir (d) yra atspausdintas skerspjūvio formoje, vadiname „bandinys D“ (90 apsisukant viena su kita sluoksniai buvo naudojami). 3D paveikslėlių sluoksnių (pilkujų linijų) ir pavyzdžio schema į (e) 3 taškų lenkimo bandymą ir (f, g) vienašio gniuždomojo stiprio bandymas statmenai sluoksnių, vadinamam „bandymo kryptimi I“ ir išilgine sluoksniu orientacija vadinama „II bandymo kryptimi“.	26
13 pav. 3D spausdinimo kelio modeliai 3D-spausdinimo programoje ir bandinių nuotraukos naudojant (a) bandinio A ir (b) spausdinti bandinį B 3 taškų lenkimo bandymui. (c) deformacija paprastuosiuose cemento bandiniuose (be pluoštų) ir anglies pluošto 3-jų punktų lenkimo bandiniai, įrodantys didelę spaudimo lankstumo jėgą.....	27

14 pav. 3D spausdinimo kelio modeliai (a) bandinys C ir (b) bandinys D gniuždymo bandymu. c) deformacijos vienetinėse cemento plokštelėse (be pluoštų) atsparumo gniuždymui bandymas rodo didelį stiprumą bandymo krypčiai I ir mažo stiprumo II bandymo krypčiai.....	27
15 pav. 3D smėlio betono spausdinimas	28
12 pav. Gipso, stiklo miltelių ir ultragarso įjungimo įtaka cemento hidratacijai priešindukcijos stadijoje (V/C = 0.46).....	28
17 pav. pav. Termopora ; duomenų kaupiklis	30
18 pav. Bandinys paruoštas lenkimo bandymui	31
19 pav. Bandinys paruoštas gniuždomojo stiprio bandymui.....	32
20 pav. Ultragarsinis dispergatorius „Bandelin electronic”	33
21 pav. Maišymo procedūra	34
22 pav. Šaldymo kamera	34
23 pav. Rišimosi trukmės priklausomybė nuo temperatūros, kai rišiklis – CEM I + kalcio formiatas	38
24 pav. Rišimosi trukmės priklausomybė nuo temperatūros, kai rišiklis – CEM I + gipsas + skystas stiklas, mišinys paveiktas ultragarsu 30s.....	39
25 pav. Priklausomybė rišimosi trukmės nuo temperatūros, kai rišiklis – CEM I + kalcio formiatas + smulkintas stiklas, mišinys paveiktas ultragarsiniu dispergatoriumi 30s.....	40
26 pav. Priklausomybė rišimosi trukmės nuo temperatūros, kai rišiklis – CEM I + kalcio formiatas + smulkintas stiklas, mišinys paveiktas ultragarsiniu dispergatoriumi 30s.....	41
27 pav. Cementinių rišiklių tankio tyrimas	42
28 pav. Cementinių rišiklių gniuždomojo stiprio nustatymas, po 148 parų.....	42
29 pav. C75+F15+SM10 ir C65+F15+SM20 po gniuždymo bandymo.....	43
30 pav. Stipris lenkiant.....	44
31 pav. Gniuždomasis stipris.....	44
32 pav. Rišiklių deformacijų (susitraukimo) pokytis	45
33 pav. Betono stipris gniuždant ir lenkiant.....	46
34 pav. Betono deformacijų (susitraukimo) pokytis	47
35 pav. Cementinio rišiklio bandiniai prieš ir po atsparumo šalčiui bandymo	48
36 pav. Betono bandiniai prieš ir po atsparumo šalčiui bandymo.....	48
37 pav. Cementinio bandinio SEM nuotrauka.....	49
38 pav. Sulfatinio rišiklio (C80/G20) bandinio SEM nuotrauka.....	49
39 pav. Kainų palyginimo grafikas.....	50

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė „Arduino Mega“ techninės charakteristikos	21
2.1 lentelė. Cemento tipas	35
3.1 lentelė Bandinių sudėtinės dalys	37
3.2 lentelė. Rišiklių sudėties lentelė	43
3.3 lentelė Betono sudėtis	46

Jakštaitė Jūratė. 3D spausdinimo technologijų taikymo statybos produktų gamyboje analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Kauno technologijos universitetas, statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Technologijos mokslai, statybos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *3D betono spausdintuvas, ultragarsinis dispergatorius, gipsas, kalcio formiatas*
Kaunas, 2019. 58 p.

Santrauka

Baigiamojo magistro projekto tikslas išanalizuoti 3D spausdinimo technologiją, ištirti, sukurti cementinį rišiklį tinkamą betono spausdinimui.

Šiame darbe išnagrinėti naujausi 3D betono spausdinimo būdai, apžvelgti realizuoti statiniai. Tyrimo metu nagrinėti betono stiprinimo būdai, išanalizuotos sudedamosios medžiagos. Atsižvelgus į išnagrinėtą literatūrą pasirinkti priedai, kuriant cementinį rišiklį betonui.

Eksperimento metu sukurtas cementinis rišiklis, nustatytos fizikinės ir mechaninės savybės, bandiniams atlikta mikrostruktūros analizė. Kuriant cementinio rišiklio sudėtį ištirtas ultragarsinio dispergatoriaus poveikis. Suformuoti betono bandiniai panaudojant sukurtus cementinius rišiklius, atliktas palyginimas ir pateiktos išvados.

Jakštaitė Jūratė. Analysis of 3D printing technologies application in construction products. *Master's thesis in Civil Engineering / supervisor assoc. prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; The Faculty of Civil Engineering and Architecture Kaunas University of Technology.*

Study field and area (study field group): Technology science, Civil engineering.

Keywords: *3D concrete printer, ultra-sonic dispersion, gypsum, calcium formate*

Kaunas, 2019. 58 p.

Summary

The aim of the final master's thesis is to analyze 3D printing technology, to study and to create a cement binder for proper concrete printing.

In this work, the most recent 3D concrete printing methods and realization of structures is reviewed. During the research, concrete reinforcement methods and components of the concrete were analyzed. Depending on the literature reviewies, accessories are selected for the cementitious binder for concrete creation.

During the experiment, the cement binder was created, the physical and mechanical properties were determined, microstructure analysis was performed on the samples. The effect of an ultrasound diperger has been studied in the development of cement binder composition. Forming of concrete samples using created cement binders, comparison and conclusions were made.

Įvadas

Temos aktualumas

Šių dienų problemos su kuriomis susiduriama statybose – laiko bei gamybos sąnaudų optimizavimas, dėl to yra ieškoma sprendimų, kurie padėtų pasiekti šių tikslų. Vis dažniau yra kalbama apie robotizavimą įvairiose srityse, tačiau statybų sferoje vis dar didelę įtaką daro „žmogiškasis faktorius“. 3D betono spausdintuvas – tai galimybė pagreitinti statybos procesus, suspėti į mažus terminus bei sumažinant klaidų riziką.

3D spausdinimas – tai skaitmeninio trimačio vaizdo perkėlimas į realybę, ir nors iš plastiko tai jau pakankamai įprastas vaizdas mūsų akims, visgi pritaikymas statybose vis dar skamba neįtikėtinais. Naudojant šią technologiją galimi produkcijos variantai yra tiek plataus masto masinė gamyba, tiek konkretaus vieno statinio nuo pradžios iki pabaigos pagaminimas.

Viena iš labiausiai paplitusių medžiagų statyboje yra betonas, kuris gali būti skirtingos sudėties, naudojant skirtingai paskirčiai. Kad 3D spausdinimas statybose būtų efektyvus, medžiaga turėtų būti parinkta tvirta, greitai stingstanti, tačiau pigi. Kadangi šių dienų aktuali ekologinė problema yra atliekų tvarkymas, kurios kenkia gamtai, siekiama kuo daugiau perdirbti ir naudoti šias medžiagas įvairiose sferose, ypač statybose. Kadangi Lietuvoje netrūksta atliekų, dėl to į betono mišinį bandoma pritaikyti perdirbamus priedus.

Šiandien yra be galo aktualu ir svarbu nustatyti medžiagos sudėtį, kuri labiausiai tiktų šiam spausdintuvui. Medžiaga turi turėti gerą gniuždomąjį stiprį, greitai kietėti bei būti ilgaamžiška. Kadangi vis dar nėra sukurtos ir užpatentuotos optimaliausios sudėties betono šiam procesui, magistro baigiamajame projekte bus tiriama pasirinkta medžiagos sudėtis, remiantis jau atliktais tyrimais ir siekiant tobulinti medžiagą 3D betono spausdinimo technologijai.

Darbo tikslas:

sukurti, iširti ir išanalizuoti 3D betono spausdintuvui tinkamą cementinį rišiklį.

Darbo uždaviniai:

1. patobulinti 3D betono spausdintuvui jau sukurtus - išrastus rišiklius;
2. iširti, kurį cheminį priedą naudojant cementinis rišiklis tampa efektyvesnis 3D betono mišinio spausdinimo technologijoje;
3. nustatyti optimaliausią cheminių priedų kiekį mišinyje skirtame 3D betono spausdintuvui;
4. iširti kokią įtaką 3D betono mišinio kietėjimo parametrui daro cementinio mišinio veikimas ultragarsu;
5. iširti sukurto 3D betono rišiklio fizikines ir mechanines savybes.

Mokslinis naujumas

Sukurtas betonas, kuris gali būti naudojamas pramonėje, spausdinant pastatus ar konstrukcijų elementus 3D spausdintuvu.

Praktinė vertė

Nustatytas, racionalus kiekis hidratacijos greitiklis, kurio sudėtyje yra smulkinto stiklo, taip sprendžiama ir ekologinė problema. Nustatyta, kad cementinį rišiklį veikiant ultragarsu tiksliai 30s. padaromas teigiamas efektas rišimosi procesui.

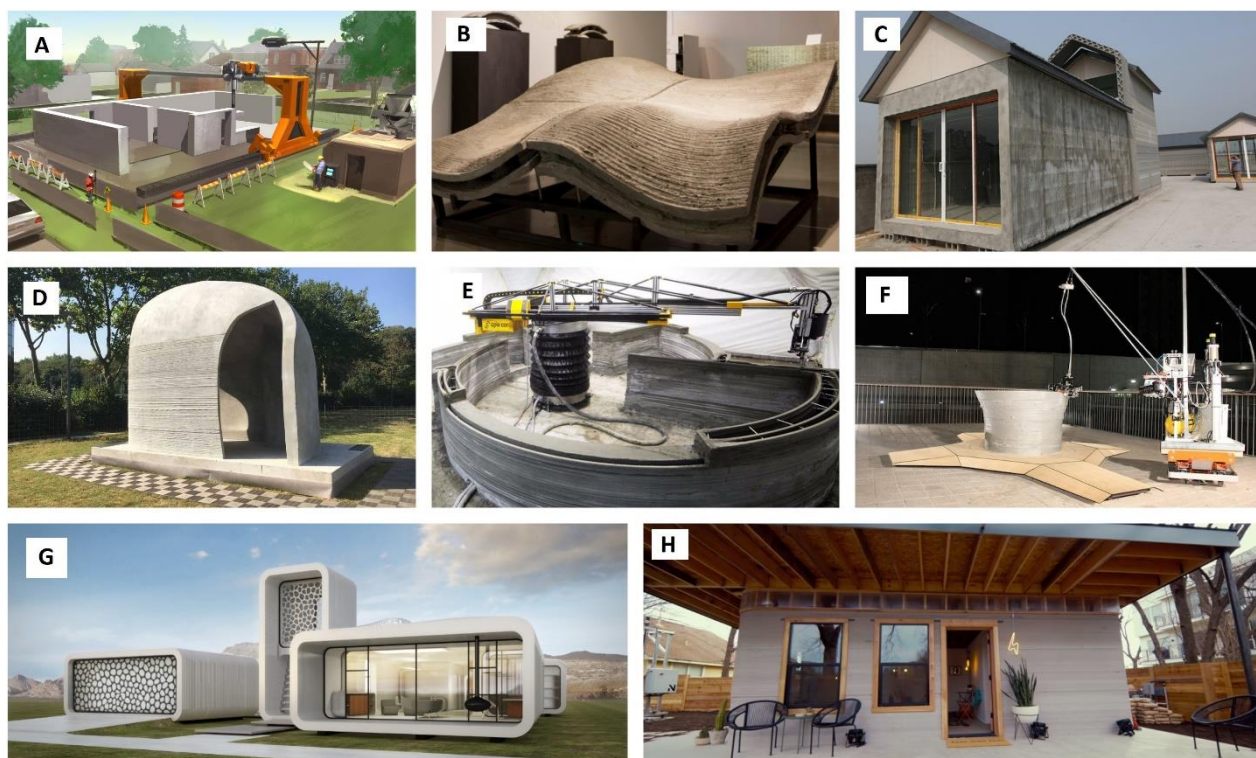
1. Literatūros analizė

1.1. 3D betono spausdinimo apžvalga

Ateities vizija yra statyti pagal skaitmeninius modelius pereinant iš 2D modelių į 3D. Sumodeliuotus sudėtingų formų komponentus projektavimo programose 3D spausdintuvai gali spausdinti be žmogaus ir įrankių pagalbos. Atsisakius klojinių bei gebant išspausdinti įvairių formų konstrukcijas būtų pasiekta architektūros laisvė taip pat ir didelis darbų palengvinimas. Spausdinimas galėtų sutaupyti sunaudojamų medžiagų kiekį, pagreitinti statybos laiką ir sumažinti šiuo metu reikalingą darbo jėgą statybvietėje. Tačiau tam, kad būtų pasiekti esami poreikiai labai svarbu sukurti unikalų mechanizmą, bei jam tinkantį betoną.

Spausdinimo technologija atsirado XX a. 9-ajame dešimtmetyje. Tačiau tik po trijų dešimtmečių tokie spausdintuvai tapo plačiai naudojami komerciniais tikslais. Pirmasis spausdintuvas buvo sukurtas 1984 metais. Jį sukūrė Chuck Hull iš bendrovės „3D Systems Corp“. 3D spausdintuvų pardavimų kiekis ir populiarumas sparčiai augo, o jų kaina mažėjo. Pagal „Wohlers Associates“ konsultavimo firmos atliktą tyrimą, 3D spausdintuvai ir su jais susijusios paslaugos 2012 metais buvo vertos 2.2 mlrd. JAV dolerių, o nuo 2011 metų jų vertė pakilo 29 procentais. Įvairios kompanijos stengiasi vystyti prieinamos kainos 3D spausdintuvus pritaikytus naudojimui namuose, o šios technologijos entuziastai buriasi į bendruomenes ir kuria atvirojo kodo programinę įrangą ir įvairius spausdintuvų prototipo modelius todėl, kad kiekvienas, tuo besidomintis žmogus galėtų pasigaminti tokį spausdintuvą namų sąlygomis už priimtina kainą. [6]

Pastaraisiais metais ši technologija parodė didelį potencialą statybų sektoriuje, kadangi jau esantys 3D spausdintuvai geba sukurti realų produktą. Ši technologija turi didelių pranašumų prieš tradicinius statybų metodus, tai laiko, medžiagų bei žmogaus darbo taupymas. Daugelyje šalių jau išbandytas šis statybos būdas įskaitant JAV, Kiniją, Prancūziją, Olandiją, Dubajų, Saudo Arabiją ir Ispaniją, taip pat mokslininkai Lietuvoje sukūrė spausdintuvą, kuriuo buvo atspausdinti fragmentai.



1 pav. Reikšmingi betono spausdinimo pavyzdžiai a) „Counter crafting“, JAV, b) Loughborough universitetas, J.K., c) Winsun, Kinija d) Xtree, Prancūzija, e) Apis-cor, Rusija, f) „Mini-builder“, Ispanija, g) Pirmasis pasaulyje 3D spausdintas biuras, Dubajus, h) „ICON“, Teksasas

Pirmasis pasaulyje atspausdintas biuro pastatas Dubajuje yra 6 metrų aukščio, 36 metrų ilgio ir 12 metrų pločio. Per 17 dienų buvo atspausdintos pastato dalys gamykloje ir užtruko tik 2 dienas jas sumontuoti objekte. Spausdinimo proceso priežiūrai reikėjo 1 žmogaus ir 7 žmonių komandos sumontuoti pastatą. Viso projekto kaina 123500 EUR. [30]

Gyvenamasis namas Rusijoje buvo atspausdintas vos per 24 valandas. Tai pirmasis pastatas, kuris buvo spausdinamas nuosekliai objekte, jo plotas 38m². „Apis Cor“ pripažino, jog namo dizainas neįprastas, tačiau pasirinkta būtent, tam, kad parodyti įrangos galimybes. Įmonė teigia, jog pilno baigtumo namo kaina įskaitant konstrukcijas, instaliacija, langus, duris interjerą ir eksterjerą kaina siekia 8 934 EUR. [23]

Naujas projektas įmonės „Icon“, kuri specializuojasi kuriant nebrangius statybos procesus. Pasirinktas gyvenamasis namas 60m² buvo atspausdintas per 24 valandas. Teigiama, jog šiuo metu kaina yra 8 800 EUR, tačiau manoma, jog ši kaina gali būti sumažinta iki 3 525 EUR. [23]

1.2. 3D betono spausdinimo privalumai

Vienas didžiausių privalumų architektūrinė laisvė. Spausdinami elementai dėl medžiagos ir sudėtinių mišinio dalių gali būti išspausdinti itin sudėtingų formų lyginant su tradiciniais. Šiuolaikiniams architektams tai yra reikšmingas faktorius, kadangi šiomis dienomis susiduriama su problemomis,

jog finansiniai ištekliai leidžia kurti tik tiesias sienas, o mažiau yra varžomi tik turintys gerus finansinius išteklius. [1]

Papildomų medžiagų išekvojimo sumažinimas. Statybų proceso metu daug medžiagų yra sunaudojamų vien klojiniams ir papildomiems darbams atlikti, būtent dėl 3D technologijos unikalumo galimas klojinių minimalizavimas, kadangi procesas vyksta robotizuotai ir reikalauja tik minimalių papildomų išteklių. Dėl šios priežasties ateityje tai gali būti pigus būdas statyti namus ypač vargstančiose šalyse.



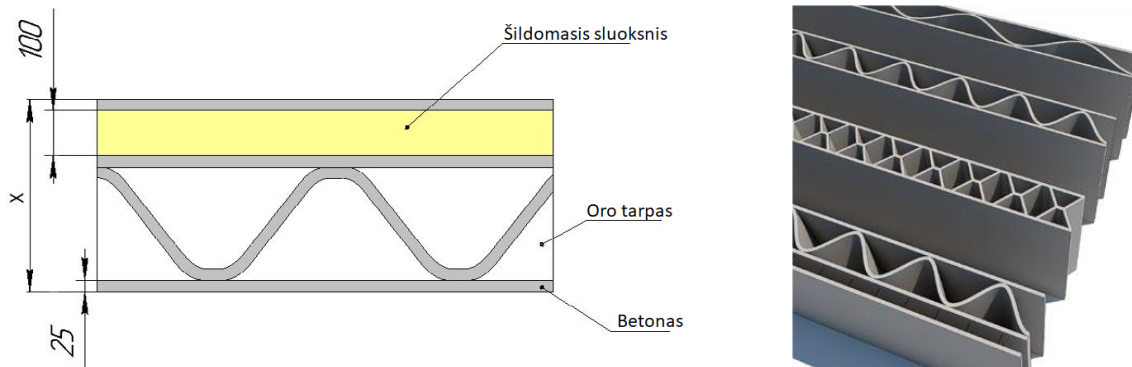
2 pav. 3D spausdinimo procesas statybų aikštelėje

Nuotoliniu būdu valdomas statybos procesas. 3D spausdinimas nereikalauja didelės darbo jėgos, jam reikia tinkamos medžiagos, spausdintuvo bei minimalios priežiūros. Dėl to ateityje yra numatoma, jog būtent šiuo būdu, bus galima statyti statinius, objektus agresyvioje ar užterštoje aplinkoje, žmonių negyvenamose vietovėse. Tiksliniai šios technologijos vartotojai galėtų būti astronautai, kadangi buveinės galėtų būti kuriamos Marse ar Mėnulyje. [6]

1.3. 3D betono spausdinimo universalumas ir technologija

3D spausdintuvas – tai prietaisas, skirtas atspausdinti įvairių formų dažniausiai plastikines detales. Šiuo atveju yra kuriama spausdinimo technologija, kuria gali formuoti trimačius objektus iš skysto betono. Tai universalus būdas gamybai, kadangi galima spausdinti gamykloje dalimis, jas surenkant, tai pat visa tai galima atlikti statybų aikštelėje. Todėl 3D spausdintuvus galima originaliai klasifikuoti pagal tai ar jie naudojami statybų aikštelėje - tiesioginis spausdinimas (šiuo atveju nereikia ruošinių bei papildomos pagalbos), ar spausdintuvas yra mobilus - lengvai perkeliamas iš gamyklos į objektą,

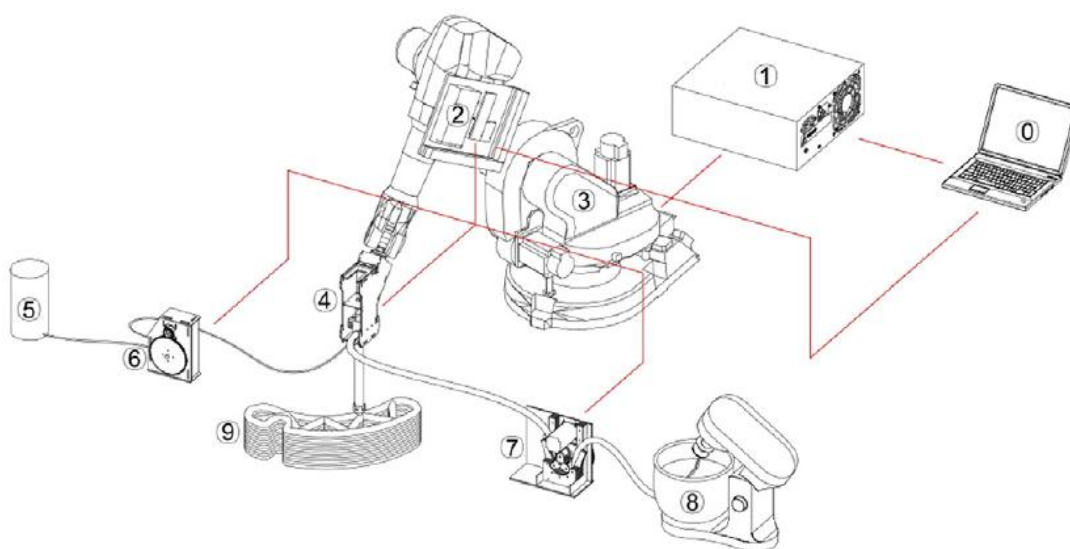
taip prijungiamos dalys ir trečias variantas, jog spausdintuvus yra stacionarus – naudojant gamykloje sukurtus fragmentus, kurie būtų transportuojami į statybvieta. Galima pastebėti, kad būtent šis gamybos būdas - betono spausdinimas - gali parodyti daug daugiau įvairovės nei šiuo metu esantis - tradicinis. Tai yra unikalus būdas statyti, tad tai gali būti modernios statybos pradžia [7].



3 pav. Sienos fragmentas spausdinamas 3D betono spausdintuvu

Išvystytas 3D spausdinimo procesas susideda iš dviejų etapų. Pirma, tinkamas mišinio paruošimas spausdinimui t. y. smulkių dalelių dydžio pasiskirstymas. Mišinys maišomas tam skirtame maišytuve siekiant išvengti klaidų spausdinant. Tuomet siurbliu perduodama į maišymo sraigatą esančiame spausdinimo galvutėje. Šiame žingsnyje yra įmaišomi priedai, siekiant pagreitinti mechanines savybes. [1]

Ypač svarbu viską tiksliai numatyti, suprasti ir stebėti hidratacijos procesą, diegiant skaitmeniniu būdu valdomas jutiklių sistemas su robotika ir taip tiksliai kontroliuoti jo evoliuciją dėl cheminių mišinių. [2]



4 pav. 3D spausdinimo sąrankos schema: 0. sistema; 1. roboto valdiklis; 2. spausdinimo valdiklis; 3. robotų rankos; 4. spausdinimo galvutė; 5. pagreitinimo agentas; 6. siurblys pagreičio įgyti; 7. peristaltinis siurblys mišiniui; 8. mišinio maišytuvas; 9. 3D spausdintas objektas. [2]

Galimi skirtingi valdiklių antgaliai – „pasyvūs“ ir „aktyvūs“. Pasyviuoju būdu betono padavimas priklauso nuo siurblio ir spausdintuvo antgalio, kuris tarsi dozatorius sukuria sluoksnio formą. Aktyviuoju būdu siurbly valdomas purkštukų, būtent tai leidžia pasiekti didelio tikslumo spausdinimo metu [10].



5 pav. 3D betono spausdintuvo valdymo antgaliai: 1. pasyvus valdymo antgalis, 2. aktyvus valdymo antgalis.

1.4. Techninė ir programinė 3D spausdintuvo realizacija

1.4.1. 3D betono spausdintuvų varikliai

3D spausdintuvų pramonėje naudojami žingsniniai varikliai, kurie gali būti itin tiksliai valdomi panaudojant šio tipo varikliams skirtus reguliatorius. Žingsninis variklis – tai sinchroninis bešepetėlinis nuolatinės srovės elektros mikrovariklis, kurio inkarų apvijomis komutatoriumi paduodami įtampos impulsai. Tokie varikliai naudojami prietaisuose, kuriuose būtinas greičio bei padėties valdymas. Po kiekvieno impulso žingsninis variklis pasisuka tam tikru kampu, vadinamu žingsniu. Žingsniniai varikliai gali judėti ir išlaikyti poziciją tam tikrame taške visiškai be grįžtamojo ryšio jutiklio, o tai yra vienas iš tokių variklių privalumų. Kitaip negu paprasti nuolatinės srovės šepetėliniai varikliai, kuriems prijungus įtampa jie nuolat sukasi, žingsninių variklių sukimosi kryptis, greitis ir galutinė pozicija priklauso nuo tam tikrų įėjimo impulsų. Tokį sudėtingą impulsų valdymą atlieka žingsninių variklių reguliatoriai.

Yra 3 pagrindiniai žingsninių variklių tipai:

- *Žingsniniai varikliai su nuolatiniais magnetais*

Tokių variklių rotorius yra nuolatinis magnetas be polių galų. Būna vientisas arba sudarytas iš atskirų dalių. Statoriaus vidiniame paviršiuje yra išfrezuoti dantukai – poliai, aplink kuriuos apvyniojamos inkaro apvijos. Šių variklių didžiausias trūkumas – sukimo momentas pernelyg mažas ir varikliai gali būti naudojami tik mažam sukimosi greičiui.

- *Reaktyvieji žingsniniai varikliai*

Tokie varikliai paprastai turi tris, o kartais ir keturias apvijas su bendru grįžtamuju ryšiu, o anksčiau aprašyti varikliai su nuolatiniais magnetais paprastai turi dvi nepriklausomas apvijas su šepetėliais ar be jų. Šių variklių momentas yra pakankamai mažas, todėl jie dažniausiai naudojami mažose pozicionavimo sistemose.

- *Hibridiniai žingsniniai varikliai*

Tai reaktyviųjų žingsninių variklių ir variklių su nuolatiniais magnetais kombinacija. Tokie varikliai turi visus privalumus, būdingus tiek reaktyviesiems, tiek varikliams su nuolatiniais magnetais rotoriuje. Šio tipo žingsniniai varikliai naudojami plačiausiai.

Pagal fazių skaičių žingsniniai varikliai klasifikuojami į dvi grupes:

- *Bipoliniai žingsniniai varikliai*

Varikliai yra dviejų fazių ir turi 4 išvadus.

- *Unipoliniai žingsniniai varikliai*

Tokie varikliai yra keturių fazių ir turi 5 ar 6 išvadus. Variklio su 5 išvadais du bendri laidai sujungti tarpusavyje. Unipolinį variklį galima naudoti kaip ir bipolinį, tuomet reikia nesujungti bendrų laidų. Tokia modifikacija padidina žingsnio kampą bei sukimosi momentą.

- *Universalieji žingsniniai varikliai*

Tai bipolinio ir unipolinio variklio darinys. Sudarytas iš 4 nepriklausomų apijų ir turi 8 išvadus. Tokį variklį galima naudoti ir kaip bipolinį, ir kaip unipolinį.

1.4.2. 3D betono spausdintuvų dalys

3D spausdintuvo prototipo modelio struktūra gali būti suskirsta į tokias dalis:

- Mechaninė dalis. Tai X/Y/Z judėjimo ašys, diržų ir skriemulių sistema, srieginės ašys, spausdinimo pagrindas.
- Elektroninė dalis. Tai mikroprocesorinis valdiklis, žingsniniai varikliai, žingsninių variklių reguliatoriai, galinės padėties jutikliai, maitinimo šaltinis.
- Ekstruderis. Tai „Šaltoji“ dalis.
- Programinė įranga. Tai CAD įrankiai, CAM įrankiai, Mikroprogramos.

1.4.3. X/Y/Z judėjimo ašys

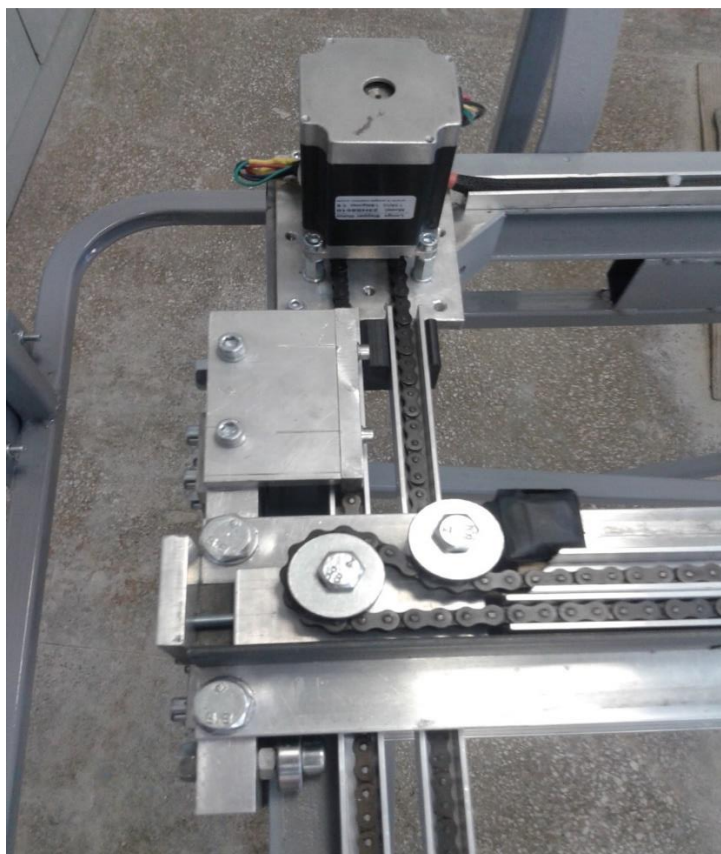
Šiuo metu yra sukurta įvairiausių formų ir konfigūracijų 3D spausdintuvų prototipų. Visų spausdintuvų pagrindinė struktūra yra vienoda. Trys, t.y. X, Y ir Z ašys, judėdamos trimatėje erdvėje leidžia ekstruderui judėti trimis kryptimis ir tokiu būdu atsidurti tam tikrame taške. Fiziškai tiesiog neįmanoma sukurti simetrinės trijų ašių Dekarto spausdintuvo konfigūracijos, todėl ašių judėjimas išdėstytas kitokiu principu. X ašis juda iš kairės į dešinę ir atgal, tuo pat metu ši ašis juda aukštyn ir leidžiasi žemyn Z ašies pagalba, o Y ašies judėjimą perteikia spausdinimo pagrindas, ant kurio ir yra spausdinamas pats modelis.



6 pav. Ašių išsidėstymas spausdintuvo prototipe

1.4.4. Grandinių ir skriemulių sistema

3D spausdintuvuose vienas svarbiausių faktorių yra tikslumas. Teisingas grandinių ir skriemulių sistemos pasirinkimas leidžia panaikinti bet kokius mechaninius laisvumus mechaninėje dalyje.



7 pav. Grandininė pavara

1.4.5. Srieginės ašis

Šiame 3D spausdintuvo prototipe panaudota srieginė ašis, skirta suteikti judėjimą Z ašiai. Z ašis neturi greitai judėti, kadangi vienas atspausdinto sluoksnio storis svyruoja nuo 1 mm iki 10 mm, todėl lygiai tiek pat turi pajudėti ir Z ašis pakeldama ekstruderį. Reikalingam tikslumui ir judėjimo jėgai srieginės ašys yra pats geriausias pasirinkimas. Kadangi šios srieginės ašys spausdinimo metu turi nemažas apkrovas dėl nemažo ekstruderio svorio, naudojamos nerūdijančio plieno ašys ir veržlės.



8 pav. Žingsninių varikliu sujungimas su srieginėmis ašimis

1.4.6. 3D betono spausdintuvo valdiklis

Žingsninių variklių valdymui panaudotas mikroprocesorinis valdiklis „Arduino Mega“. Arduino – atviro kodo platforma, suteikianti galimybę valdyti įvairius elektronikos komponentus. Šis valdiklis programuojamas populiarios C ir C++ kalbų sintaksėmis, turi didelę įvairių programų pavyzdžių duomenų bazę, gali būti suderinamas su įvairiais papildomais skydeliais (ang. Shield), kurie suteikia galimybę valdikliui gauti interneto prieigą, prisijungti prie WiFi tinklo, komunikuoti su kitais įrenginiais Bluetooth ryšiu. „Arduino Mega“ techninės charakteristikos tenkina visus keliamus reikalavimus, kurie reikalingi 3D spausdintuvo prototipo valdymui. „Arduino Mega“ naudoja ATmega 2560 mikroprocesorių, kuris turi 54 skaitmeninius įėjimus/išėjimus ir 16 analoginių įėjimų.

1.1 lentelėje yra pateiktos mikroprocesorinio valdiklio techninės charakteristikos.

1.1 lentelė „Arduino Mega“ techninės charakteristikos

1	Mikroprocesorius	ATmega2560
2	Darbinė įtampa	5V
3	Maitinimo įtampa (rekomenduojama)	7-12V
4	Maitinimo įtampa (ribos)	6-20V
5	Skaitmeninių I/O skaičius	54(15 iš jų turi PWM išėjimus)
6	Analoginių įėjimų skaičius	16
7	Nuolatinė I/O srovė	40mA
8	Nuolatinė 3.3V srovė	50mA
9	Flash atmintis	256 KB iš kurių 8 KB panaudoti pakeidyklei
10	SRAM	8 KB
11	EEPROM	4 KB
12	Taktinis dažnis	16 Mhz
13	USB naudojamas lustas	MAX3421E

Sujungti „Arduino Mega“ plokštei su žingsninių variklių reguliatoriais, galinės padėties jutikliais naudojama papildoma RAMPS 1.4 plokštė. Ši plokštės versija turi 5 išėjimus žingsniniams varikliams (X, Y, Z ašims ir 2 išėjimai ekstruderiams), maitinimo šaltinio pajungimo įvadai, 6 galinės padėties jutiklių įėjimai. Šiame 3D spausdintuvo prototipe naudojamas vienas ekstruderis vietoj dviejų.

1.4.7. Programinė įranga

Programinė įrangos parinkimas ir suderinimas yra vienas svarbiausių 3D spausdintuvo prototipo vystymo etapų. Kiekvienas žingsninis variklis turi judėti į tam tikrą pusę, tam tikrą žingsnelių kiekį, kaitinimo elementas turi įsijungti ir išsijungti tam tikru metu. Mikroprocesorinis valdiklis turi gauti reikiamas skaitmeninės 3D detalės koordinatas ir reikiamu metu žingsninių variklių reguliatoriams paduoti impulsus. Visa 3D spausdintuvo prototipo programinė įranga gali būti suskirstyta į tris dalis:

1. CAD įrangai.
2. CAM įrankiai.
3. Tvaryklės.

1.4.8. Valdymo programa

3D spausdintuvo prototipe naudojamas mikroprocesorinis valdiklis „Arduino Mega“, į kurį sukompilijuojama ir įrašoma programa. „Marlin v1“ – viena iš daugelių programų, kurios naudojamos 3D spausdintuvų mikroprocesoriuose. Kaip ir kitos programos, skirtos valdyti 3D spausdintuvų mikroprocesorius, ši programa priima G-kodą (ang. G-code) per nuoseklųjį prievadą ir siunčią

signalus žingsniniams varikliams. G-kodas – tai programavimo kalba, skirta, realizuoti daugelyje sričių. Daugiausiai G-kodas naudojamas automatizavime, kuris yra kompiuterinės inžinerijos dalis. G-kodai naudojami žingsninių variklių valdymui naudoja NIST RS274NGC G-kodo standartą. Iš esmės programa palaikydama tokį standartą gali būti naudojama ir CNC (ang. Computer Numerical Control) frezavimo, graviravimo ir kitokių staklių valdymui. Anksčiau aprašyta „Cura 14.01“ programinė įranga kiekvienam „supjaustytam“ detalės sluoksniui sugeneruoja atitinkamą G-kodą. Tokio kodo aprašymas rankiniu būdu reikalauja labai daug laiko, tačiau atliekant įvairius derinimo procesus žinoti pagrindinius G-kodo funkcijas yra pravartu. Marlin v1 palaiko ne visas G-kodo komandas.

1.5. Rišamosios medžiagos 3D spausdinimo technologijai

Svarbi dalis 3D spausdinime yra tinkamos medžiagos parinkimas, statybose pasirinkta medžiaga yra betonas. Betono yra įvairių rūšių, tačiau būtent šiam būdui reikia itin greit kietėjančio, kadangi spausdinimo proceso metu naudojamas nuoseklus sluoksniavimo būdas. Ypač svarbu, kad liejant trečia sluoksnį pirmasis būtų jau pakankamai tvirtos konsistencijos. Dėl šių poreikių yra naudojami greitikliai, kurie išsiskiria savo savybėmis. Pagrindinė sudedamoji dalis yra cementas (CEM I), tačiau kitos papildomos medžiagos skiriasi savybėmis, kurios yra svarbios kietėjimo procesui pagreitininti.

Rišamoji medžiaga yra cementas (CEM I). Tai mineralinė hidraulinė rišamoji medžiaga, kuri sumaišyta su vandeniu rišasi ir kietėja, o sukietėjusi nepraranda stiprumo bei tūrio pastovumo ore ir vandenyje. Pagal sudėtį cementai yra skirstomi į įprastinius ir specialiuosius. Statyboje dažniausiai naudojama portlandcementis bei sudėtinis portlandcementis. Pagrindinės portlandcemenčio sudedamosios dalys yra klintys ir molis taip pat kaip priedas (nedidelis kiekis) dedamas ir gipsas, kuris reguliuoja rišimosi trukmę [14].

Statybinis gipsas – orinė rišamoji medžiaga, baltos spalvos miltelių pavidalo, sumaišytas su vandeniu kietėja. Savybės: rišimosi trukmė 2-20min, tai priklauso nuo žaliavos kokybės. Stipris gniuždant yra apie 2 kartus didesnis nei lenkiant. Sukietėjęs gipsas pasižymi dideliu atviru poringumu, vandens įgeriamumu ir mažu atsparumu šalčiui [15].

Kalcio formiatas – fizikinės ir cheminės savybės baltas kristalas ar milteliai, šiek tiek higroskopinis, šiek tiek kartaus skonio. Neutralus, netoksiškas, vandenyje tirpus. Žiemą kalcio formiatas gali būti naudojamas kaip pagreičio betonavimas cemento sausojo mišinio sistemai. paspartinti cemento kietėjimo greitį, sutrumpinti krešėjimo laiką, ypač žiemos metu, siekiant išvengti kondensacijos esant žemai temperatūra.

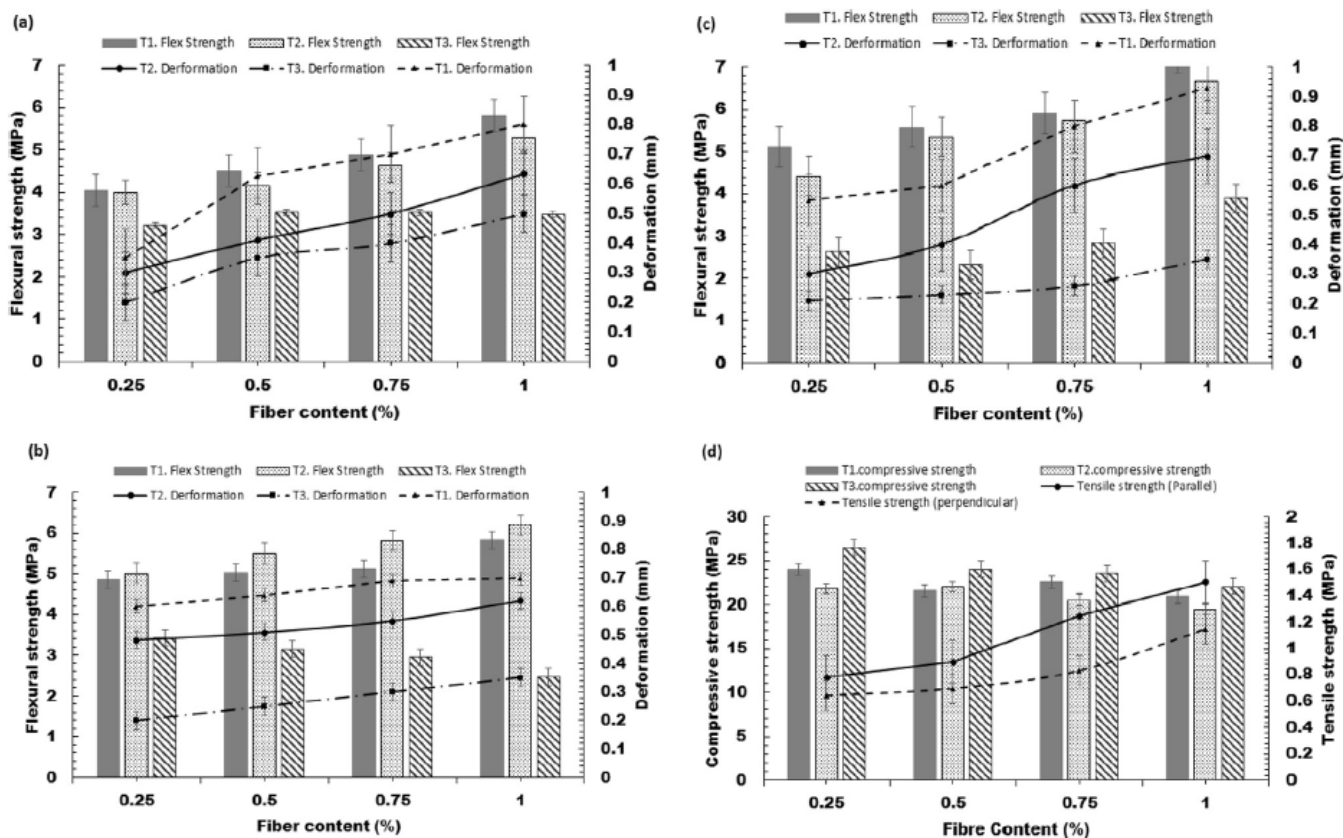
Priedai – tai mineralinės arba organinės medžiagos, kurie į mišinius dedami nedideliais kiekiais reguliuojant jų technologines savybes ir kietėjimo procesus.

Natrio silikatas – (skystas stiklas) bespalvis skystis. Naudojamas kaip vandens emulsinių dažų priedas, didinantis jų rišlumą, betono hidroizoliacines savybes stiprinanti priemonė, vandenį "minkštinantis priedas". Norint sustiprinti betono hidroizoliacines savybes, tik ką betonuotą bet dar nesustingusį paviršių padenkite storu sluoksniu natrio skysto stiklo ir tolygiai jį paskirstykite po visą plotą. Leiskite išdžiūti. Medžiagai sukietėjus susidarys vandeniui nelaidi danga. Skystas stiklas padidina atsparumą drėgmei betono gaminiuose.

Smulkintas (maltas) stiklas – perdirbama žaliava, kurią galima naudoti betonui stiprinti.

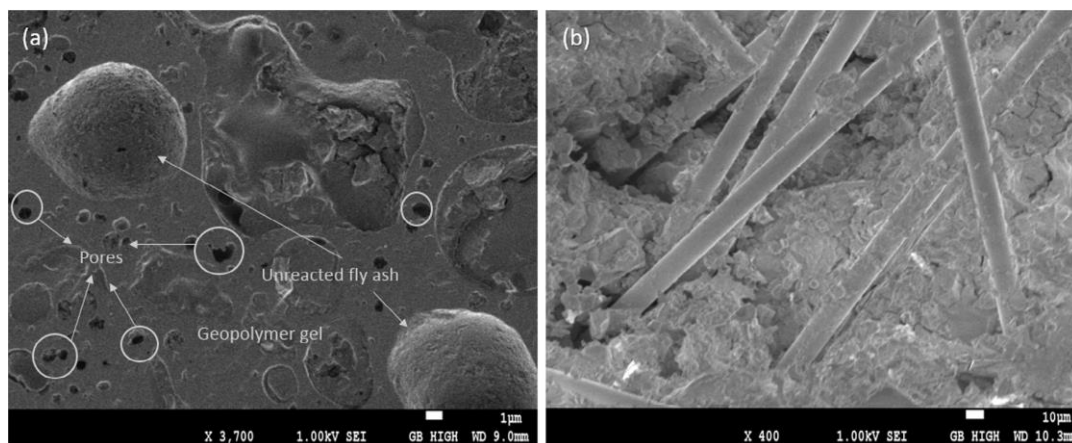
1.6. 3D betono stiprinimo būdas su armatūra ar fibromis

Ieškoma įvairių būdų kaip stiprinti betoną, kuri galimą spausdinti vienas iš jų – fibros arba armatūra. Tiriamos medžiagos sudėtis (pluoštu sustiprintas geopolimerinis skiedinys): liejiniai pelenai (F klasė) 23%, šlakas (granuliuotos grunto dulkės šlakai) 5%, mikro silicio dioksido 3%, smulkių (upių) smėlių, kurių maksimalus (1,18) 47 mm dydžio, skystas kalio silikatas (molinis santykis 2,0) 15%, hidroksipropilmetilceliuliozė (HPMC) 2% ir vandentiekio vanduo 5%. Tradiciniam geopolimeriui trūksta tikslostropinio savybių, kuris yra būtinas ekstruzijos pagrindu pagamintam betonui, todėl sukurtas naujas receptas, įtraukiant tam tikrą flokuliantą, nekeičiant geopolimero mechanizmo. Supjaustyto stiklo pluoštas (GF: tankis 1,7-2,2 gm / cm³) su trijų skirtingų ilgių (3 mm, 6 mm ir 8 mm) ir keturi skirtingi procentai (0,25%, 0,5%, 0,75% ir 1%) atskiriami ir sumaišomi sausoje medžiagoje - skystas silikatas ir vanduo. Medžiagos parinkimas ir pluošto matmenys grindžiami tik preliminariais duomenimis, skirtais plėtoti spausdintą 3D spausdinimui skirtą medžiagą. Apribojama 1% pluošto kiekio, kad būtų išvengta užsikimšimo ir pasiekama spausdinimo proceso metu sklaidi ir nuolatinė ekstruzija. [3]



9 pav. GF/geopolymerinio mišinio lenkimo savybės su fibromis (a) 3 mm (b) 6 mm (c) 8 mm ilgių ir (d) gniuždymo ir tempimo savybės su 3 mm GF. (Rezultatai gauti po 28 parų)

Gauti eksperimentiniai rezultatai parodo, kad pluošto pridėjimas vos pagerina gniuždomąją stiprumo jėgą, tačiau poveikis yra gerai matomas lenkimo stiprumui bei lankstumui. Siekiant mažinti medžiagos anizotropiškumo reikia atlikti daugiau tyrimų. [3]



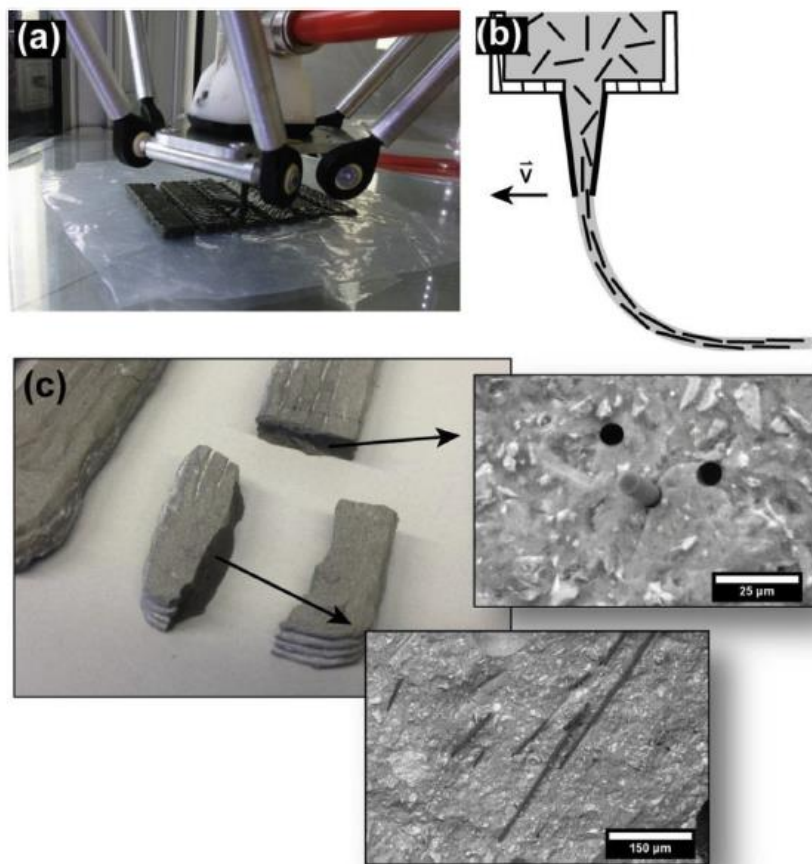
10 pav. Elektroninio mikroskopu spinduliute (Fe-SEM) gautas vaizdas (a) padengtos geopolimerinės matricos (b) 6 mm GF / geopolimerinės matricos lūžio paviršiaus.

1.7. 3D betono stiprinimo būdas termiškai apdorojant pluoštą

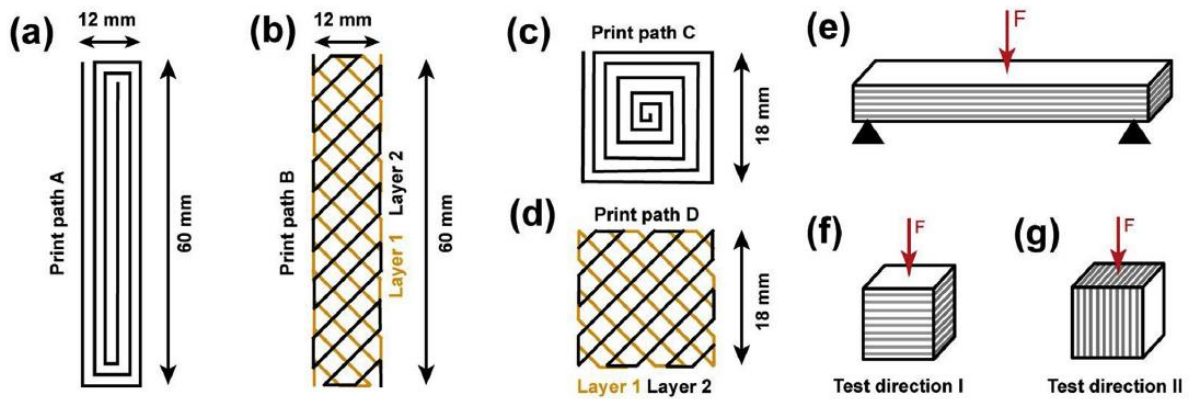
Įprastai portland cemento statybinės medžiagos yra didelės gniuždymo jėgos (maždaug 20-60 MPa), tačiau trūkumas yra stiprumas lenkiant ir lankstumas lyginant su paprastųjų cementų (3-10 MPa).

Įprastai plieno armatūra dedama tam, kad pagerinti cemento lenkimo jėgą. Tačiau šis sutvirtinimo būdas lemia laiko ir medžiagų ir darbo jėgos sąnaudas statybos metu, kai plienas dedamas rankomis į konstrukcijų liejimo formas. Siekiant išvengti armatūros, mišinys papildomas aukštos kokybės sintetinių pluoštų (pvz., stiklo arba anglies pluošto fibros). [9]

Pluošto apdorojimas turi užtikrinti gerą fibrų pasiskirstymą ir pluošto sukibimą su cementine medžiaga, visi pluoštai termiškai apdorojami, pašalinant pluošto dydį ir užtikrinant hidrofiliinį pluošto paviršių. Anglies pluoštui - 400 ° C, stiklo ir bazalto pluoštui 500 ° C terminis apdorojimas užtikrina polimero dydžio pašalinimą, kaip parodyta papildomame pav 1.8. [9]



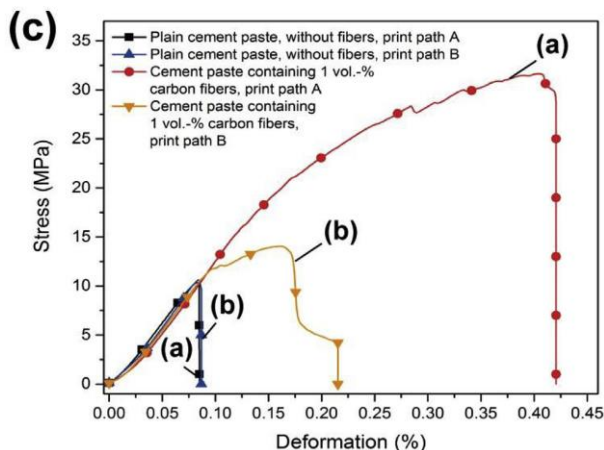
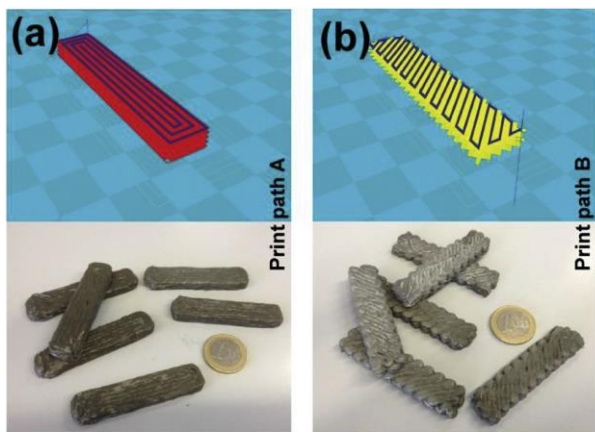
11 pav. a) 3D spausdintuvu spausdinti pluošto bandiniai, atliekamas 3-jų taškų lenkimo bandymas (matmenys 6-12 mm × 60 mm), nuotrauka. (b) Pluošto pasiskirstymo spausdinimo metu schema. c) Nuotrauka, kurioje yra lygiaverčių armatūros pluoštų ir gautų ESEM mikroskopu, kurie rodo pluošto kryptį (statmenai ir lygiagrečiai bandinio lūžio paviršiui).



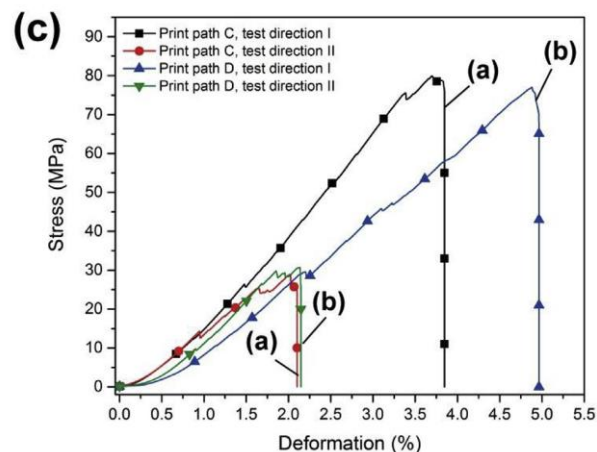
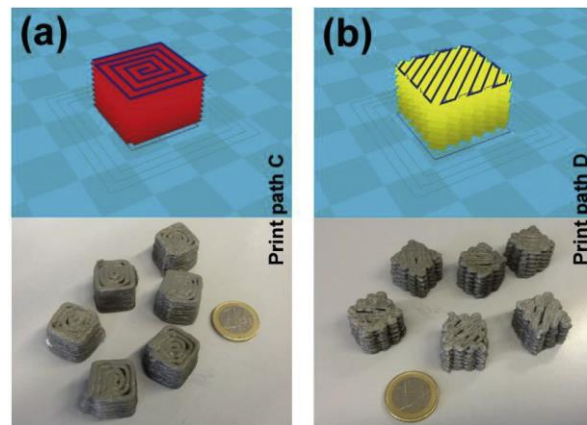
12 pav. Lenkimo bandymo pavyzdžiai. Spausdintų bandinių „takelių“ vaizdas iš viršaus (a) lygiagrečiai išspausdintas „bandinys A“. b) „bandinys B“, 2 skirtingi sluoksniai (sukasi 90 ° vienas kitam). Trisluoksniu gniuždomojo stiprumo bandymams naudojamų pavyzdžių spausdinimo takelių viršutinis vaizdas (c) yra lygiagrečiai išspausdintas, vadinamas „bandinys C“ ir (d) yra atspausdintas skerspjūvio formoje, vadiname „bandinys D“ (90 apsisukant viena su kita sluoksniai buvo naudojami). 3D paveikslėlių sluoksnių (pilkųjų linijų) ir pavyzdžio schema į (e) 3 taškų lenkimo bandymą ir (f, g) vienašio gniuždomojo stiprio bandymas statmenai sluoksnių, vadinamam „bandymo kryptimi I“ ir išilgine sluoksniu orientacija vadinama „II bandymo kryptimi“.

Bandomosios lankstumo stipris svyruoja nuo 10 iki 30 MPa, priklausomai nuo armatūros pluošto tipo ir spausdinimo kelio. Kiekvienoje bandymų serijoje turi būti bent po 5 vnt bandinių. 3D modeliai ir paruošto testo nuotraukos pavyzdžiai pateikti 6 a ir b pav. Bandinių gautas stiprumas apie 10 MPa, kai naudojama paprastas cemento mišinys, ir apie 13 MPa, jei yra stiklo ar bazalto pluošto. Sustiprintas anglies pluošto bandinys, priešingai, rodo žymiai didesnę stiprį (30 MPa). Taigi, tinkamas skirtingų pluoštų pasirinkimas daro didelę įtaką testavimo lankstumui.[9]

Abiem atvejais (bandinių A ir B), stiprumas 10-11 MPa gali pasiekti kai yra paprastas cemento mišinys (4c pav.). Sustiprintas bazalto ir stiklo pluoštais nepadidino lenkimo jėgos, nes lyginant su paprasto cemento mišiniu, gaunami panašūs apie 10 MPa abiejų tipų pluoštai. Dar kartą nustatyta, kad anglies pluošto sutvirtinimas padidina lenkiamąjį stiprį, kurio vertė siekė iki 14 MPa. Paprasto cemento mišinys turi panašių įtempių deformacijų kreives nepriklausomai nuo pasirinkto spausdinimo kelio (A arba B), todėl šie pluošto tipai nepadidins maksimalios lenkimo jėgos pateiktoje 3D spausdinimo technologijoje, taip pat ir anglies pluoštai. Tačiau jie neleidžia visiškam bandinio suirimui atsiradus pirmiesiems įtrūkimams.[9]



13 pav. 3D spausdinimo kelio modeliai 3D-spausdinimo programoje ir bandinių nuotraukos naudojant (a) bandinio A ir (b) spausdinti bandinį B 3 taškų lenkimo bandymui. (c) deformacija paprastuosiuose cemento bandiniuose (be pluoštų) ir anglies pluošto 3-jų punktų lenkimo bandiniai, įrodantys didelę spaudimo lankstumo jėgą



14 pav. 3D spausdinimo kelio modeliai (a) bandinys C ir (b) bandinys D gniuždymo bandymu. c) deformacijos vienetinėse cemento plokštelėse (be pluoštų) atsparumo gniuždymui bandymas rodo didelį stiprumą bandymo kryptčiai I ir mažo stiprumo II bandymo kryptčiai.

Gaminamiems bandiniams dėl pluošto derinimo labai padidėjo lenkimo jėga. Nustatyta, kad 30 MPa yra didžiausias lenkimo stiprumas kai 1 vol.% anglies pluošto. Nors pagaminti bandiniai yra didelio lenkiamojo stiprio iki 30 MPa, visgi gaminant konstrukcijas papildomai būtų reikalinga armatūra. [9]

1.8. 3D spausdinimas specialiu mišiniu

Statybose pagrindinė medžiaga, kurią galima spausdinti atsižvelgiant į statybinių medžiagų savybes – tai betonas. Rusijos mokslininkai teigia, jo nebūtinai, tai gali būti tvirtas mišinys – smėlio betonas M300, kuris greitai nekietėja, tačiau turi pakankamai gerą laikomąją galią dėl to išspausdintas laiko formą [12].



15 pav. 3D smėlio betono spausdinimas

Žinoma šis būdas nėra tinkamas dideliems statiniams, tačiau nedidelio dydžio spausdinamiems fragmentas puiku alternatyva.

1.9. Ultragarso poveikis rišimosi procesui

Atliekant tyrimus yra siekiama atrasti ne tik kaip sustiprinti betoną, tačiau kaip pasiekti, kad medžiagos rišimosi greitis būtų pakankamai greitas, kad spausdinant sluoksnius, pirmieji jau „laikytų“ spausdinamus ant jų. Lietuvoje buvo atliekami tyrimai, kuriais buvo siekta nustatyti gipso poveikį ir mišinio veikimą ultragarsu. [28]

Gypsum			Glass Powder			Ultra-sonic activation		
Composition	Final Set, min	Max Temperature, °C	Composition	Final Set, min	Max Temperature, °C	Composition	Final Set, min	Max Temperature, °C
C100G0	–	–	C80G20+0% GP	19	27,03	C80G20+0 s	19	27,03
C80G20	20	27,72	C80G20+5% GP	20	25,94	C80G20+5 s	8	28,80
C60G40	19	31,49	C80G20+10% GP	20	25,59	C80G20+10 s	7	29,51
C40G60	16	35,17	C80G20+15% GP	30	25,65	C80G20+20 s	6	30,33
COG100	30	40,25	C80G20+20% GP	29	25,66	C80G20+30 s	5	35,22

16 pav. Gipso, stiklo miltelių ir ultragarso įjungimo įtaka cemento hidratacijai priešindukcijos stadijoje ($V/C = 0.46$)

Šio tyrimo metu buvo nustatyta, kad rišiklis suaktyvintas ultragarsiniu dipergatoriumi suaktyvina hidratacijos procesą yra sukuriama daugiau entrantinokristalų. Rišimosi laikas buvo gerokai sumažintas, o tai leidžia padidinti spausdinimo technologijos greitį [13].

2. Tyrimų metodika

2.1. Reglamentavimas

Šiame skyriuje nurodomi standartai ir reglamentai pagal kuriuos atliekami tyrimai.

LST EN 206:2013+A1:2017 „Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis.“ standartas, kuriame nurodomi pagrindiniai reikalavimai betonui. [29]

LST EN 196-9:2010 „Cemento bandymų metodai. 9 dalis. Hidratacijos šiluma. Pusiau adiabatiniis metodas.“ Standartas, pagal kurį buvo nustatoma hidratacijos metu išskiriamas šilumos kiekis.[30]

LST EN 12390-7:2009 „Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis“ pagal šį standartą buvo apskaičiuojamas betono tankis.[31]

LST EN 12390-5:2009/P:2011. „Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris.“ Standartas pagal, kurį buvo atliekamas lenkimo bandymas, nustatomas lenkimo stipris.[32]

LST EN 12390-3:2009 „Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris“ Standartas, kurio vadovaujantis buvo nustatomas gniuždymo stipris.[33]

LST EN 12617-4:2003. „Betoninių konstrukcijų apsauginiai ir remontiniai produktai bei sistemos. Bandymo metodai. 4 dalis. Susitraukimo ir išsiplėtimo nustatymas.“ Standartas pagal, kurį buvo atliekami susitraukimo matavimai.[34]

LST 1428-19:2016 „Betonas. Bandymo metodai. 19 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas vienpusiu užšaldymu ir atšildymu“ standartas pagal kurį nustatoma svarbi betono savybė – ilgaamžiškumas, apskaičiuojami gaminio atsparumo šalčiui ciklai.[35]

2.2. Tyrimo metodai

Hidratacijos procesų tyrimas – buvo vykdomas pusiau adiabatiniu metodu, kadangi nėra galimybės sudaryti idealias sąlygas (t. y. sudaryti tokias sąlygas, kad bandiniai visiškai būtų nepaveikti išorės veiksnių, nebūtų temperatūros pokyčių). Tyrimas buvo atliekamas pagal standartą LST EN 196-9:2010 mišinių hidratacijos šilumos išsiskyrimo nustatymo metodus.

Kad gauti reikiamus duomenis buvo naudojamas kalorimetras, kuris yra skirtas temperatūrai, šilumos kiekiui, šiluminei talpai matuoti. Ši informacija davikliais (termoporų ir duomenų kaupiklio pagalba) perduodama į kompiuterinę programą. Pagal gautus duomenis nustatoma: rišimo greitis priklausomai nuo temperatūros pokyčių. Kad duomenys būtų kuo tiksliau nustatyti, gaminius reikia sudėti vienu metu.



17 pav. pav. Termopora ; duomenų kaupiklis

Tankio nustatymas – Tankis nustatomas pagal LST EN 12390-7:2009 standartą (sukietėjusios betono tankio nustatymo metodą). Naudojant svarstyklės (paklaida 0,05g) pasveriamas betono masė, naudojant slankmatį išmatuojami bandinio matmenys ir apskaičiuojamas tūris. Tankis gaunamas apskaičiuojant medžiagos masės ir tūrio santykį.

Lenkimo stiprio nustatymas – lenkimo stipris nustatomas pagal LST EN 12390-5:2003 standartą

Bandymas atliekamas bandymo mašina, kuri atitinka EN 12390-4, bandiniai lenkiami kol lūžta pusiau.

Apkrova perduodama įtaisais, kuris susideda iš dviejų viršutinių ir dviejų atraminių ritinių, kurie padedami skersai bandinio ir taip tolygiai paskirsto mašinos perduodamą apkrovą. Ritiniai: plieniniai, skritulinio skersmens nuo 20 iki 40 mm, ilgis ne mažiau 10 mm ilgesnis už bandinio plotį. Šie ritiniai, turi laisvai sukotis apie savo ašį, jie gali būti pakreipti statmenai bandinio išilginiai ašiai.

Bandiniai – prizmės (pagal EN 12390-1) suformuoti turi atitikti EN 12350-1 ir EN 12390-2.

Siekiant kuo tikslesnio rezultato prieš atliekant bandymą turi būti paruošiama mašina - švariai nuvaloma, taip pat ir bandiniai - nušveičiamas jų paviršius.

Parentamas pastovus apkrovos didinimo greitis (+/-1 % tikslumu). Apkrova bandiniui perduodama be smūgių ir nepertraukiamai didinama. Pagal gautus duomenis apskaičiuojamas lenkimo stipris ($f_c = \frac{3}{2} \cdot \frac{f \cdot l}{d_1 \cdot h}$, f_c – stipris lenkiant (MPa); F – ardomoji jėga (N); l – atstumas tarp apatinių ritinių (mm); d_1 ir h – skerspjūvio šoniniai matmenys (mm)).



18 pav. Bandinys paruoštas lenkimo bandymui

Gniuždymo stiprio nustatymas – gniuždymo stipris nustatomas pagal LST EN 12390-3:2001 standartą.

Bandymo mašina, kuri atitinka EN 12390-4 bandiniai gniuždomi iki kol suirs.

Bandiniai turi atitikti šių standartų reikalavimus: EN 12350 – 1, EN 12390 -1 , EN 12390-2 arba EN 12504-1. Bandiniai turi būti šių formų: kubas, cilindras arba kernas.

Prieš pradėdant bandymą, reikia tinkamai paruošti mašiną. Paviršius nuvalomas nuo galimos perteklinės drėgmės ar kitų nešvarumų. Bandinio paviršius nušveičiamas, kad būtų geras sąlytis su mašinos plokštelėmis.

Tarp bandymo plokščių sudedami tik tarpo reguliavimo blokai ir pagalbines plokštelės, jokie kiti papildomi intarpai negalimi. Bandiniai padedami, taip, kad apkrova veiktų statmenai formavimo kryptčiai. Naudojant pagalbines plokšteles jos prigludžiamos ties viršutine ir apatine bandinio sienelėmis. Padėti ant platformos bandiniai reguliuoju, kad jų padėtis būtų tiksliai centre.

Parengamas pastovus apkrovos didinimo greitis (+/-10 % greitis). Apkrova bandiniui perduodama be smūgių ir nepertraukiamai didinama. Pasiekus maksimalų gniuždomąjį stiprį duomenis perduodami į kompiuterį (t. y. didžiausia ardomoji apkrova – F). Stipris gniuždant apskaičiuojamas ($f = \frac{F}{A}$; f – gniuždomasis stipris (MPa), F- didžiausia ardomoji apkrova (N), A – bandinio skerspjūvio plotas (mm)).



19 pav. Bandinys paruoštas gniuždomojo stiprio bandymui

Veikimo ultragarsiniu dispergatoriumi procedūra – bandymams buvo naudojamas ultragarsinis dispergatorius „Bandelin electronic UW 3400“, galia siekia 400 W, ultragarso konverteris UW3400, stiprintuvas SH 3425, strypas (zondas) titano, plokščiu galu, diametras 25 mm.

Išanalizavus anksčiau atliktus tyrimus buvo žinoma, jog rišklio veikimas ultragarsiniu dispergatoriumi sukelia molekulių suaktyvėjimą dėl to buvo pasirinktas atlikti tyrimus šiuo būdų ir palyginti gautus rezultatus. Pagal ankstesnius tyrimus buvo nustatytas optimaliausias veikimas 30s. dėl to pasirinkta veikti tokia pačia trukme. Pirmiausia paruošiamas mišinys sumaišomas su vandeniu ir tik tuomet įmerkiamas ultragarso zondas. Indas judinamas rankiniu būdu, o visas likęs procesas veikia automatiškai nustačius laiką programoje.



20 pav. Ultragarsinis dispergatorius „Bandelin electronic“

Maišymo procedūra – atliekant eksperimentinę dalį pirmiausia duomenys buvo procentiškai apskaičiuojami. Sudedamosios mišinio dalys dozuojamos pagal masę. Prieš suformuojami, medžiagos pasveriamos - suruošiama visi bandinių variantai, paruošiamas tikslus vandens kiekis pamatuojama vandens temperatūra, kad būtų vienoda visuose bandiniuose, tuomet iš eilės maišomos su vandeniu kol tampa homogeninės. Svarbu tai atlikti greitai siekiant tikslių duomenų kituose bandymuose.



21 pav. Maišymo procedūra

Susitraukimo deformacijų nustatymas – tam, kad atlikti šį tyrimą buvo naudojamas deformacijų matavimo prietaisas. Matavimo prietaisas elektrinis, stovas metalinis. Prieš pradėdant bandinių matavimus paruošiamas prietaisas: metalinį strypelį įstatant tarp jutiklių atžymima nulio vertė. Betono prizmė (standartinių matmenų 4x4x16cm) su reperiais galuose yra pastatoma į stovą tuo pačiu principu kaip strypelis – liečiant jutiklius. Tuomet matomi duomenys ekrane rodomi milimetrais, juos užsirašome.

Atsparumo šalčiui nustatymas – norint atlikti šį bandymą betono bandiniai pirmiausia merkami į 3% druskos tirpalą, tuomet šią talpą uždengiama ir įdedama į šaldymo kamerą, kurioje periodiškai temperatūra keičiama nuo -20°C iki $+20^{\circ}\text{C}$, taip sudaroma itin agresyvi aplinka bandiniams, kadangi natūraliai temperatūra taip greit nekinta. Tuomet nustatomas ciklų skaičius kiek bandinys atlaiko iki pirmojo suirimo.



22 pav. Šaldymo kamera

Mikrostruktūros tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM ang. *Scanning Electron Microscope*)– tyrimams naudojamas QUANTA200FEG skenuojantis elektroninis mikroskopas. Šiuo mikroskopu galima nustatyti kietėjimo metu susidarancios kristalohidratines fazes, jų dydžius, formas, pagal gautas nuotraukas galima atpažinti mineralus. Elektroniniu mikroskopu nustatomi 0,005 - 1µm dalelių dydžiai, kietųjų kūnų integralinis ir diferencinis poringumas, kristalinės struktūros parametrai ir defektai. Mikroskopas sukuria gylio (trimačio) vaizdą, skenuodamas bandinio paviršių didelės energijos elektronų pluošteliu.

2.3. Medžiagos naudotos eksperimente

Rišamoji medžiaga

Tyrimuose pagrindinė naudota risamoji medžiaga yra **cementas (CEM I)**. Tai mineralinė hidraulinė risamoji medžiaga, kuri sumaišyta su vandeniu rišasi ir kietėja, o sukietėjusi nepraranda stiprumo bei tūrio pastovumo ore ir vandenyje. Pagal sudėtį cementai yra skirstomi į įprastinius ir specialiuosius.

Statyboje dažniausiai naudojama portlandcementis bei sudėtinis portlandcementis. Pagrindinės portlandcemenčio sudedamosios dalys yra klintys ir molis taip pat kaip priedas (nedidelis kiekis) dedamas ir gipsas, kuris reguliuoja rišimosi trukmę.

Tyrimų metu naudotas portlandcementis:

2.1 lentelė. Cemento tipas

Cemento tipas	Šarmai, sk. Na ₂ O ekv.	gniuždomasis stipris po 2 parų	gniuždomasis stipris po 28 parų
CEM I 42,5 R LST EN 197-1 : 2011	neribojamas	28 ± 2 MPa	54 ± 3 MPa

Tyrimė taip pat buvo naudota **kalcio sulfatas (gipsas)**. Tai mineralinė orinė risamoji medžiaga, kurią sudaro pusvandenis kalcio sulfatas. Bepalvė gipso forma vadinama selenitu. Kaitinant iškastinę gamtinę gipso uolieną dvivandenis gipsas dehidratuoja ir taip gaunami smulkūs pusvandenio gipso kristalai.

Visiškai bevandenė kalcio sulfato forma vadinama anhidritu. Anhidritas taip pat gaunamas kaitinant, tačiau aukštesnėje temperatūroje ~650 °C, pasiekus šią temperatūrą vanduo yra visiškai pašalinamas, kad gauti anhidritą uolieną yra malama kartu su priedais – kietėjimo katalizatoriais (kalkėmis, granuliuotu aukštakrosnių šlaku ir kt.).

Aktyvūs mineraliniai priedai

Priedai – tai mineralinės arba organinės medžiagos, kurie į mišinius dedami nedideliais kiekiais reguliuojant jų technologines savybes ir kietėjimo procesus. Priedų paskirtis gali labai skirtis, vieni naudojami plastifikavimui, kiti lėtinti ar greitinti rišimąsi, mažinti aplinkos poveikio įtaką ir panašiai.

Kalcio formiatas – fizikinės ir cheminės savybės baltas kristalas ar milteliai, šiek tiek higroskopinis, šiek tiek kartaus skonio. Neutralus, netoksiškas, vandenyje tirpus.

Savitasis sunkis: 2,023 (20 °C deg.)

Tūrinis tankis: 900-1000 g / kg

Skilimo temperatūra: daugiau nei 400 °C.

Žiemą kalcio formiatas gali būti naudojamas kaip pagreičio betonavimas cemento sausojo mišinio sistemai. paspartinti cemento kietėjimo greitį, sutrumpinti krešėjimo laiką, ypač žiemos metu, siekiant išvengti kondensacijos esant žemai temperatūrai

Mišinyje buvo naudotas mineralinis priedas - **skystas stiklas**, tai vientisa amorfinė medžiaga silicio dioksido (SiO₂) pagrindu) ši medžiaga pagreitina bei padaro efektyvesniu, kietėjimo procesą. Tai skysta medžiaga, kuri bandymo metu pipete yra injektuojama mažais kiekiais.

Mineraliniai mikroužpildai

Smėlis. Eksperimente naudotas kvarcinis smėlis iš Zatyšių karjero, kuris buvo sumaltas laboratorijoje. Bleino rodiklis po apdirbimo – 1500 kg/m²

3. Eksperimentai, bandymai ir rezultatai

Eksperimentinėje dalyje pateikiami duomenys gauti skirtingų bandymų metu. Pirmoje duomenų lentelėje yra pateikta skirtingų cementinio rišiklio sudėtys. Atliekant tyrimą buvo keičiama rišiklio sudėtis - užpildus bei rišimųjų medžiagų santykį. Pirmiausia, buvo nustatomas vandens ir rišiklio santykis, kuris visų bandymų metu išlieka pastovus $V/C=0,46$. Rezultatai, duomenys gaunami tyrimus atliekant pusiau adiabatiniu kalorimetru.

Bandiniai žymimi tokiais trumpiniais:

C– cemento kiekis bandinyje

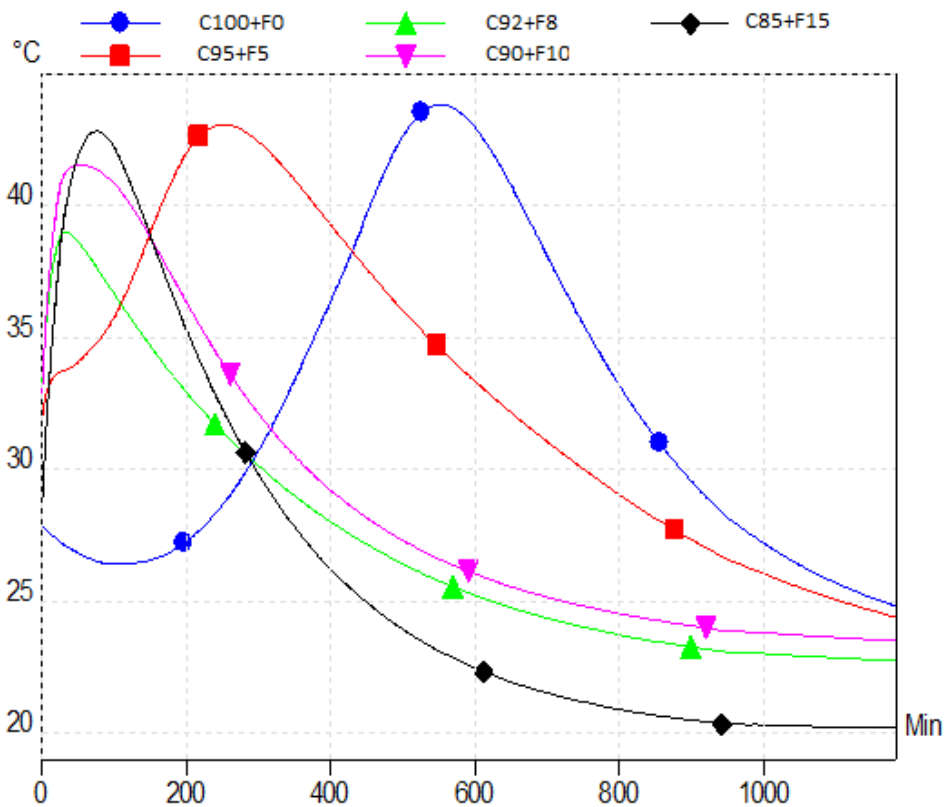
F– kalcio formiato rišiklio kiekis bandinyje

ST–skysto stiklo kiekis bandinyje

SM– smulkinto stiklo kiekis bandinyje

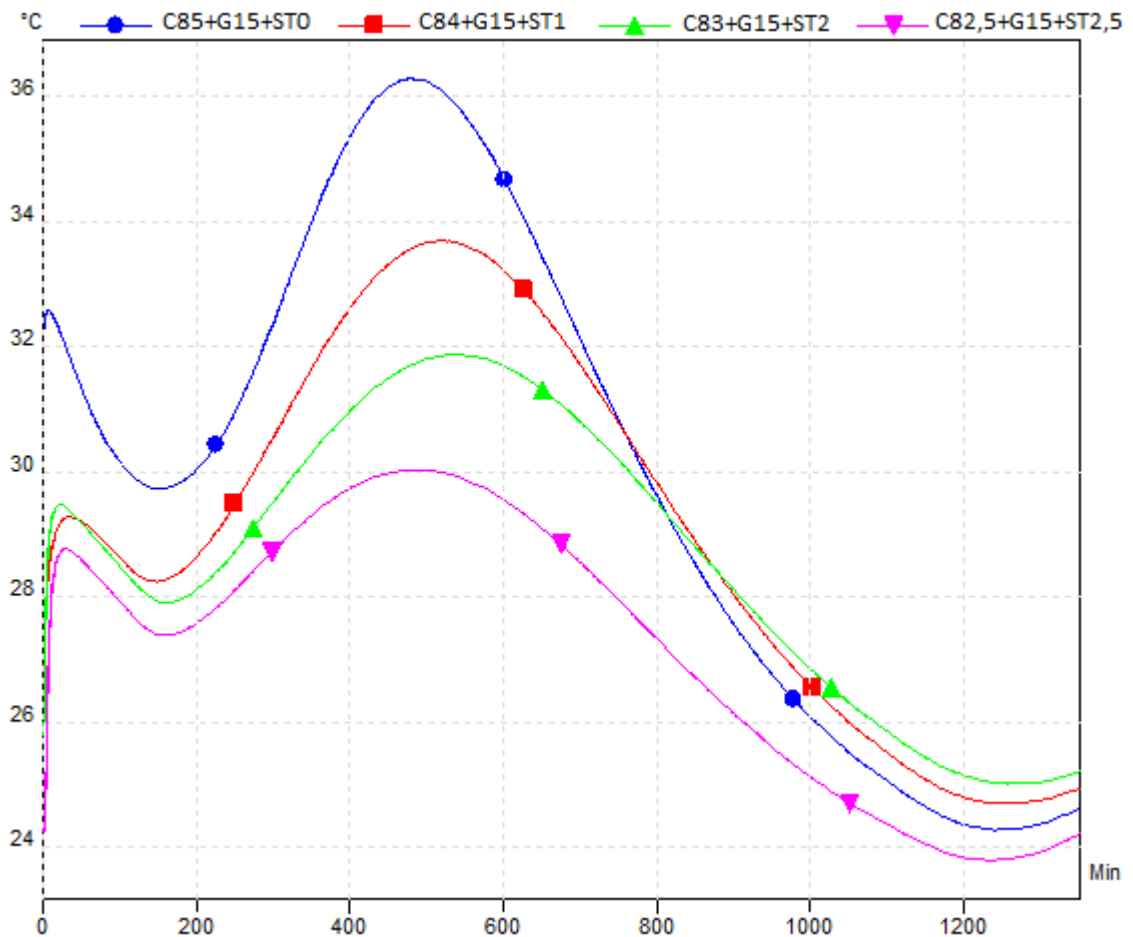
3.1 lentelė Bandinių sudėtinės dalys

Sudėties Nr.	Žymėjimas	Cemento kiekis, %	Kalcio formiato kiekis, %	Gipso kiekis, %	Skysto stiklo kiekis, %	Smulkinto stiklo kiekis, %	Eksperimento metu vandens santykis ir temperatūra
1	C100+F0	100	0	-	-	-	$V/C=0,46$; 25°C
2	C95+F5	95	5	-	-	-	$V/C=0,46$; 25°C
3	C92+F8	92	8	-	-	-	$V/C=0,46$; 25°C
4	C90+F10	90	10	-	-	-	$V/C=0,46$; 25°C
5	C85+F15	85	15	-	-	-	$V/C=0,46$; 25°C
6	C85+G15+ST0	85	-	15	0	-	$V/C=0,46$; 29°C
7	C84+G15+ST1	84	-	15	1	-	$V/C=0,46$; 29°C
8	C83+G15+ST2	83	-	15	2	-	$V/C=0,46$; 29°C
9	C82,5+G15+ST2,5	82,5	-	15	2,5	-	$V/C=0,46$; 29°C
10	C100+F0+SM0	100	0	-	-	0	$V/C=0,46$; 24°C
11	C85+F5+SM10	85	5	-	-	10	$V/C=0,46$; 24°C
12	C82+F8+SM10	82	8	-	-	10	$V/C=0,46$; 24°C
13	C80+F10+SM10	80	10	-	-	10	$V/C=0,46$; 24°C
14	C75+F10+SM15	75	15	-	-	10	$V/C=0,46$; 24°C
15	C85+F15+SM0	85	15	-	-	0	$V/C=0,46$; 26°C
16	C80+F15+SM5	80	15	-	-	5	$V/C=0,46$; 26°C
17	C75+F15+SM10	75	15	-	-	10	$V/C=0,46$; 26°C
18	C70+F15+SM15	70	15	-	-	15	$V/C=0,46$; 26°C
19	C65+F15+SM20	65	15	-	-	20	$V/C=0,46$; 26°C



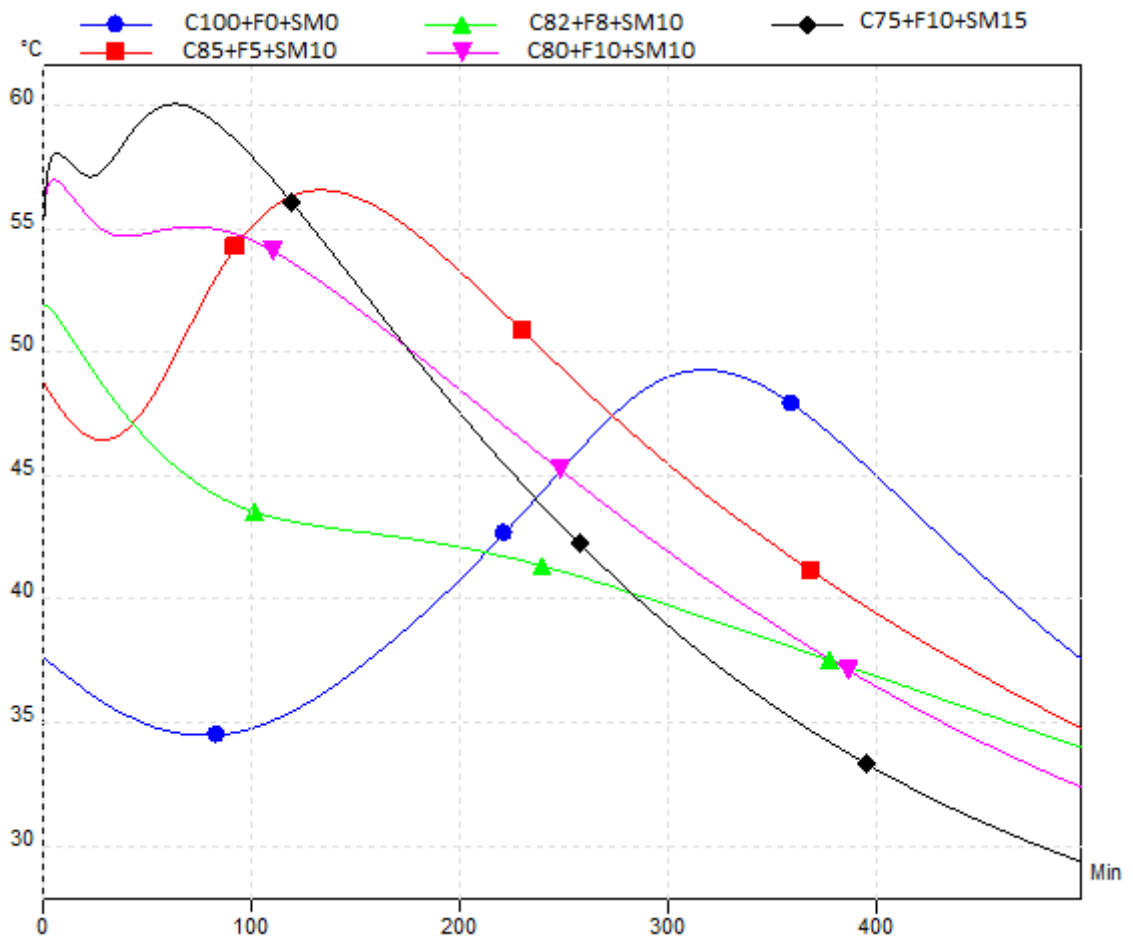
23 pav. Rišimosi trukmės priklausomybė nuo temperatūros, kai rišiklis – CEM I + kalcio formiatas

Atliktas bandymas, kurio metu buvo keičiamas kalcio formiato kiekis, o cemento išliko stabilus, vandens santykis $V/C=0,46$, vandens temperatūra šio bandymo metu buvo 25°C . Grafike [žiūrėti Pav. 23] galime matyti, jog šio bandymo metu rezultatai gauti geriausi panaudojant daugiausiai kalcio formiato t. y. kalcio formiato 15% ir cemento 85%.



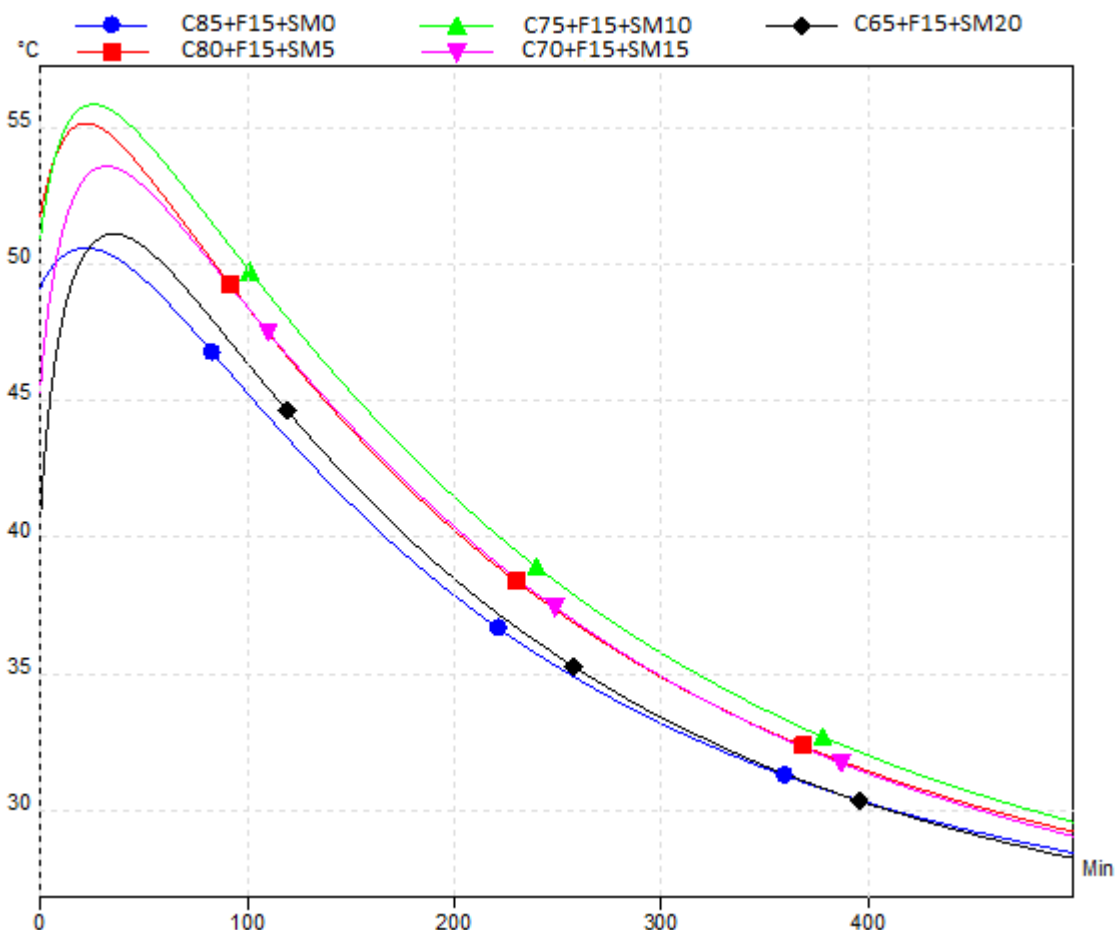
24 pav. Rišimosi trukmės priklausomybė nuo temperatūros, kai rišiklis – CEM I + gipsas + skystas stiklas, mišinys paveiktas ultragarsu 30s.

Atlikto bandymo metu gautas priklausomybės grafikas [žiūrėti Pav. 24]. Bandymui naudota CEM I + gipsas + skystas stiklas, vandens santykis $V/C=0,46$, vandens temperatūra šio bandymo metu buvo 29°C , sumaišius medžiagas su vandeniu mišinys buvo veikiamas ultragarsiniu dispergatoriumi „Bandelin electronic UW 3400“ 30s. Kadangi šios tyrimo metu vandens temperatūra buvo aukšta, tad dėl temperatūros galutinis stiprumas būtų mažesnis, nepaisant to gauti rezultatai nebuvo patys tinkamiausi betonui, kuris pradėti rišti turėtų itin anksti. Šio bandymo metu nustatyta, kad kombinacija skysto stiklo ir gipso (kartu su cementu) yra netinkama, kadangi skystas stiklas šiuo atveju pablogina natūralaus rišiklio (gipso) gerąsias savybes, kurios žinomos iš anksčiau atliktų tyrimų rezultatų.



25 pav. Priklausomybė rišimosi trukmės nuo temperatūros, kai riškis – CEM I + kalcio formiatas + smulkintas stiklas, mišinys paveiktas ultragarsiniu dispergatoriumi 30s.

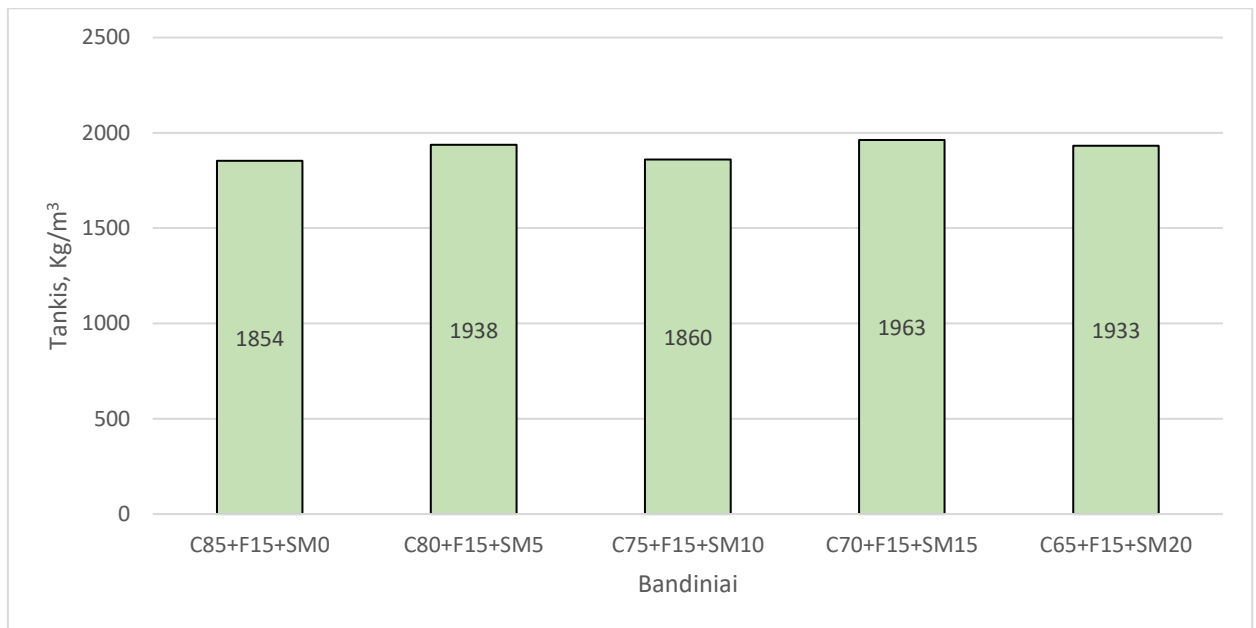
Kadangi pirmojo bandymo metu buvo nustatytas teigiamas kalcio formiato efektas, šio bandymo metu buvo siekta nustatyti kaip gautus rezultatus pakeistų šiam mišiniui pridėjus papildomą priedą – smulkintą stiklą. Cemento ir smulkinto stiklo kiekiai pastovūs, kalcio formiatamo kintamas. Vandens santykis $V/C=0,46$, vandens temperatūra šio bandymo metu buvo 24°C , sumaišius medžiagas su vandeniu mišinys buvo veikiamas ultragarsiniu dispergatoriumi „Bandelin electronic UW 3400“ 30s. Pagal gautus rezultatus nustatyta [žiūrėti Pav. 25], kad greičiausiai rištis pradeda naudojant 10% smulkinto stiklo, 15% kalcio formiato, 75% cemento.



26 pav. Priklausomybė rišimosi trukmės nuo temperatūros, kai rišiklis – CEM I + kalcio formiatas + smulkintas stiklas, mišinys paveiktas ultragarsiniu dispergatoriumi 30s.

Šio bandymo metu buvo siekta patikrinti smulkinto stiklo derinant su kalcio formiatu efektą, keičiant smulkinto stiklo kiekį, o cemento ir kalcio formiato išlaikant stabilius, kiekis kalcio formiato pasirinktas atsižvelgiant ir trečiojo bandymo matu gautus rezultatus. Vandens santykis $V/C=0,46$, vandens temperatūra šio bandymo metu buvo 26°C , sumaišius medžiagas su vandeniu mišinys buvo veikiamas ultragarsiniu dispergatoriumi „Bandelin electronic UW 3400“ 30s. Pagal gautus rezultatus [žiūrėti Pav. 26] buvo nustatyta, kad greičiausiai rištis pradėjo mišinys tokios pat sudėties kaip ir praėjusio bandymo metu, tad tai patvirtini, kad naudojant kalcio formiatą geriausias efektas gaunamas pridėjus ir smulkintą stiklą santykių: C75+F15+SM10.

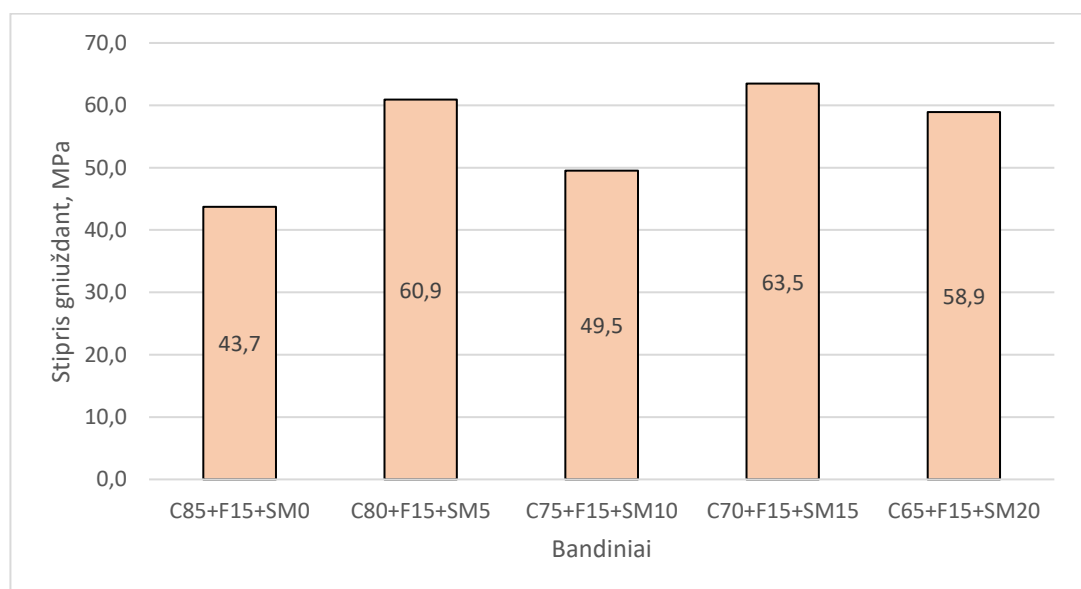
Buvo atliekamas tankio tyrimas, kad galima buvo matyti, kaip kinta tankis bandiniuose atsižvelgiant į sudėtį. Tankio tyrimas buvo atliktas pagal paskutiniojo bandymo metu (pusiau adiabatiniu metodu) parinktas sudėtis, suformuota buvo cilindro forma.



27 pav. Cementinių rišiklių tankio tyrimas

Tankio tyrimas buvo atliktas po 148 parų, kadangi, bandiniai visą šį laiką kietėjo vandenyje. Gauti duomenys atitinka tai ko ir buvo tikėtasi, kadangi rišiklių tankis yra iki 2000 kg/m³ didžiausias tankis gautas esant C70+F15+SM15.

Toliau buvo vykdomas gniuždomojo stiprio tyrimas. Kadangi bandiniai cilindro formos, lenkimo bandymo atlikti nebuvo galimybės.



28 pav. Cementinių rišiklių gniuždomojo stiprio nustatymas, po 148 parų

Pagal gautus rezultatus nustatyta, kad gniuždomasis stipris gautas didelis siekė net 63,5 MPa. Atsižvelgiant, kad bandymas buvo atliktas po 148 parų, tai jau yra tikrasis jų stiprumas. Visų šių bandinių stiprumai yra pakankami. Kadangi 3D betonui visgi pagrindinė kriterijus yra greitas rišimosi

laikas tolimesniems tyrimams pasirinktas mišinio sistemos buvo atsižvelgiant į pirminius duomenis atliktus pusiau adiabatiniuo tyrimo metu – kurio rišimosi laikas buvo optimaliausias.



29 pav. C75+F15+SM10 ir C65+F15+SM20 po gniuždymo bandymo

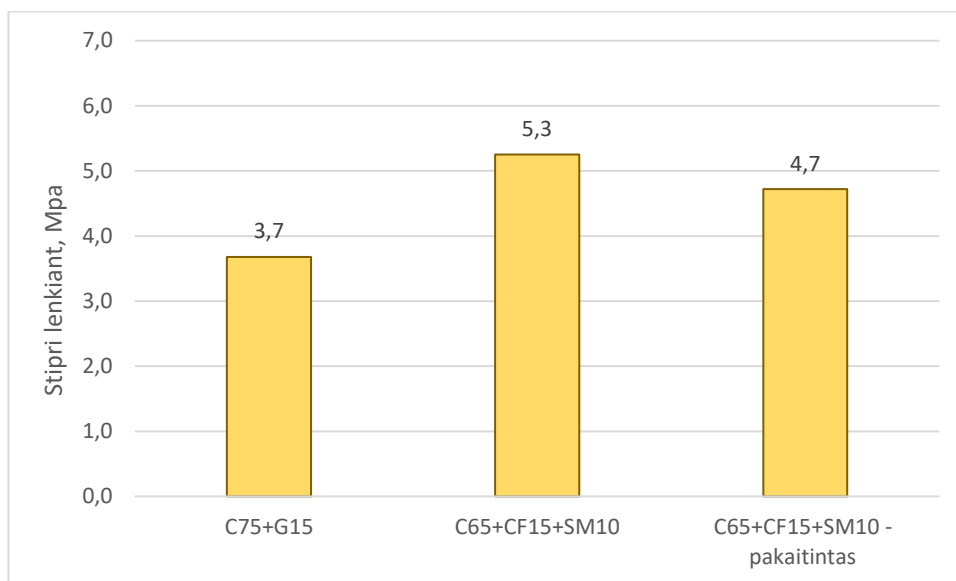
Tolimesniuose tyrimuose buvo atsižvelgta, jog gipso su cementu rišiklio sistema jau iširta ir yra tinkama 3D betonui, dėl to pasirinkta toliau palyginti savybes su cemento su kalcio formatu bei smulkinto stiklo rišikliu. Šiuo atveju jau skysto stiklo su gipsu nebus naudojama, kadangi iš pusiau adiabatiniuo tyrimo nustatyta, jog ši kombinacija netinkama.

3.2 lentelė. Rišiklių sudėties lentelė

Sudėties Nr.	Žymėjimas	Cemento kiekis, %	Kalcio formiato kiekis, %	Gipso kiekis, %	Smulkinto stiklo kiekis, % nuo cemento kiekio
1	C75+G15	75	-	15	-
2	C65+CF15+SM10	65	15	-	10
3	C65+CF15+SM10 - pakaitintas	65	15	-	10

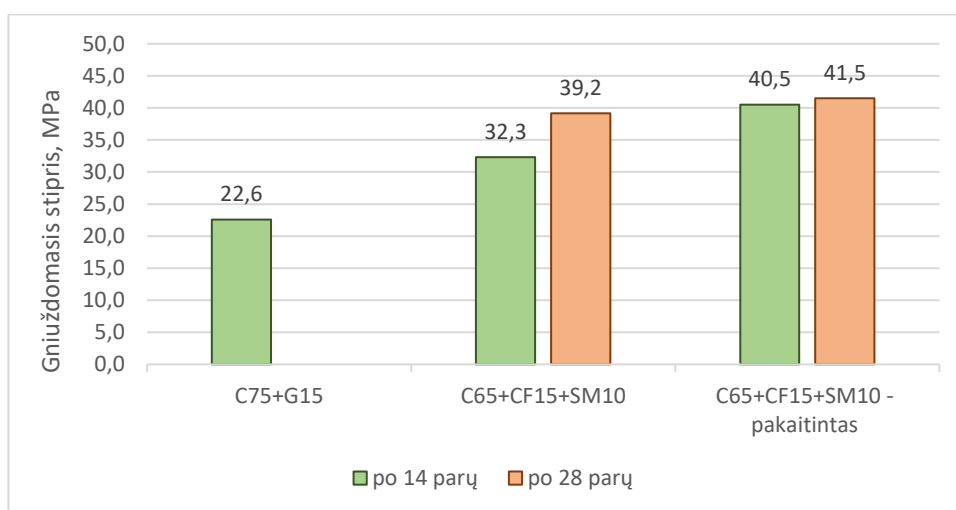
Nuspręsta vieną iš bandinių su kalcio formatu ir smulkintu stiklu sumaišius su vandeniu pakaitinti iki 30°C ant elektrinės viryklės (t. y. pakaitinti prieš pat sudedant į formas). Viena iš spausdinimo technologijų yra prieš pat spausdinimo momentą, spausdinimo galvutėje mišinį pakaitinti, kad pagreitinti betono rišimosi procesą.

Mišiniai suformuoti į prizmės formą ir pamerkti į vandenį. Po 14 parų atliktas lenkimo stiprio bandymas.



30 pav. Stipris lenkiant

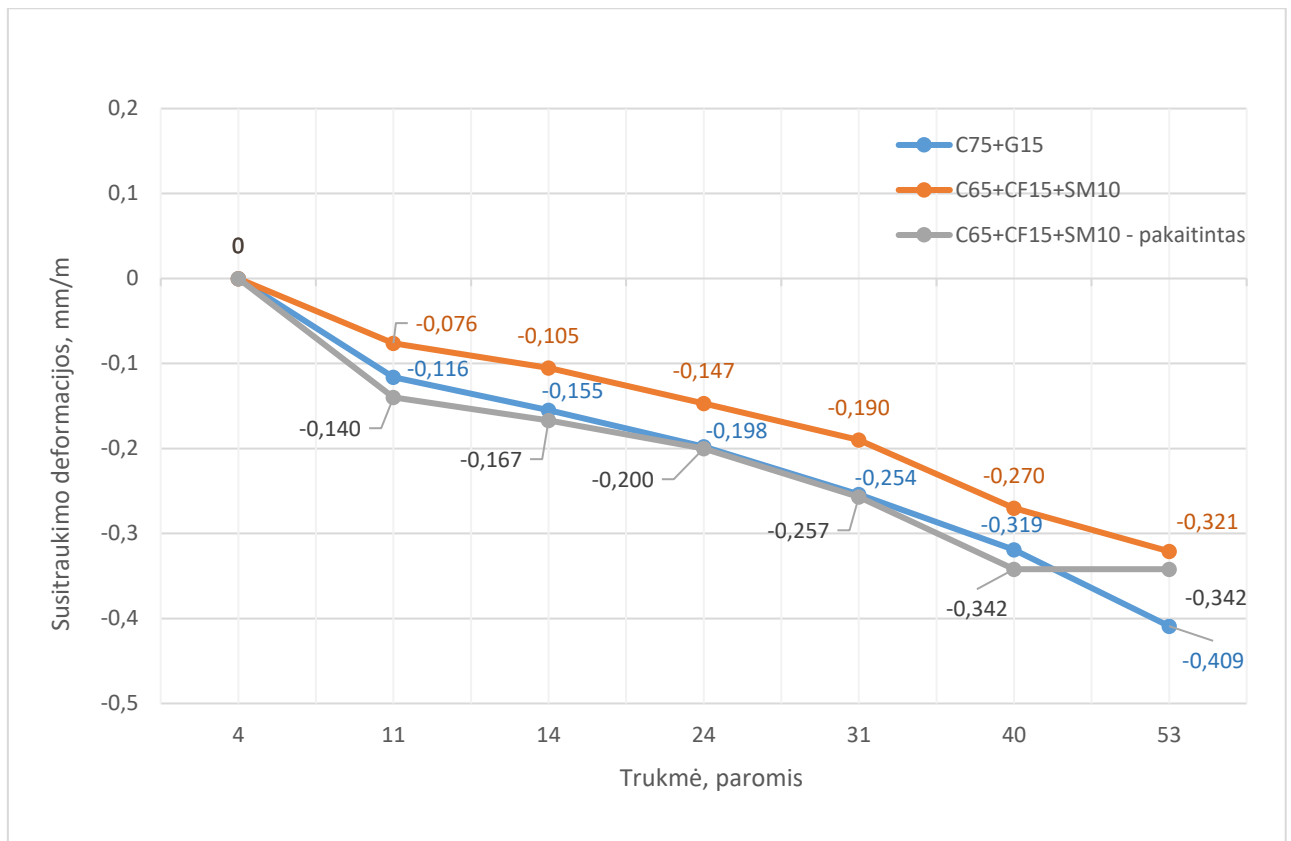
Kaip ir tikėtasi stipris lenkiant nėra didelis, tačiau pakankamas, kadangi tai ne armuotas rišiklis. Tikėtina, jog palikus ilgiau kietėti stipris būtų didesnis. Toliau buvo daromas gniuždymo bandymas



31 pav. Gniuždomasis stipris

Gauti rezultatai, kad mišinys su kalcio sulfatu bei maltu stiklu turi didesnę gniuždomąją stiprį. Du bandiniai buvo palikti dar 14 parų kietėti, tačiau jau sausoje aplinkoje. Pagal gautus stiprius galima daryti išvadą, jog pakaitintas mišinys greičiau pasiekia stiprumą ir po 14 parų pakito nedaug lyginant su mišiniu, kuris nebuvo kaitinamas, jo stiprumas padidėjo 6,8 MPa., tačiau galutiniam stiprumui pakaitinimas didelės įtakos neturi, kadangi stiprumas panašaus dydžio.

Tokios pat sudėties mišiniai buvo paruošti susitraukimo matavimui.



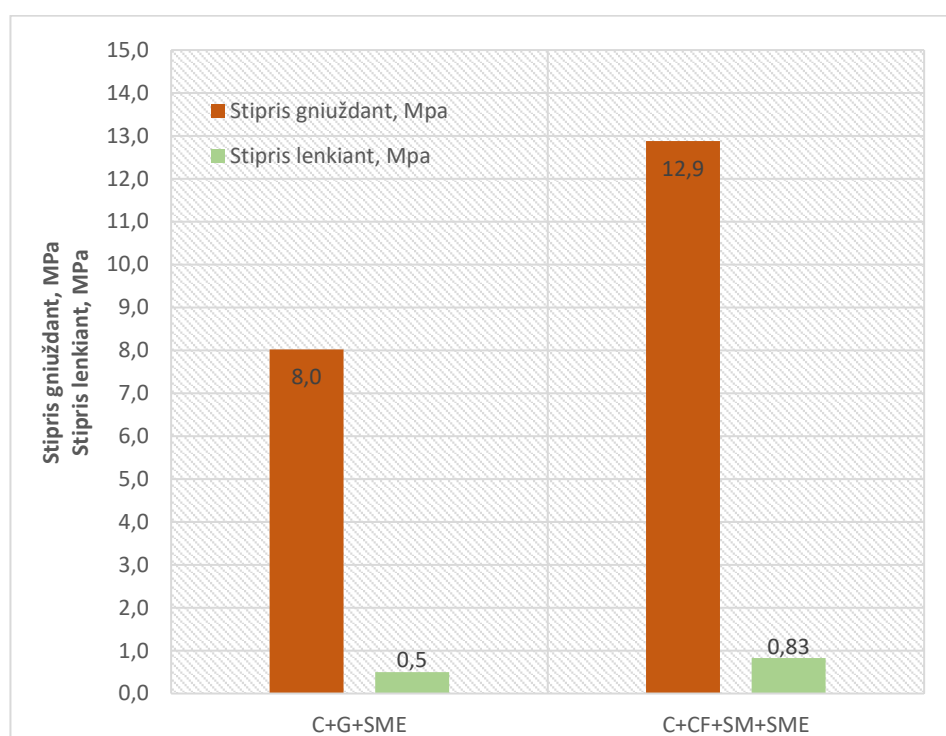
32 pav. Rišiklių deformacijų (susitraukimo) pokytis

Gaminiai išformuoti ir pirmą kartą išmatuoti po 4 parų. Pagal atliktus matavimus nustatymas, kad per 53 paras didžiausia deformacija yra rišiklio kurio sudėtyje buvo gipso - 0,409 mm/m, tuo tarpu su kalcio sulfatu ir smulkintu stiklu mišinys siekė 0,342mm/n ir 0,321mm/n. Pagal šias kreives [žiūrėti Pav. 32] galima matyti, kad didžiausia susitraukimo deformacija visų sudėčių bandiniams įvyko per pirmąją savaitę.

Atsižvelgiantį atliktus tyrimus bei išnagrinėtą literatūrą nuspręsta pasirinkti dviejų tipų rišiklius ir sumaišius su smėliu išanalizuoti betoną, kuri būtų tinkamas 3D betono spausdinimui. Pasirinkta smėlio betono sudėtyje užpildyti 50%, likusi dalis rišiklio, kuris pagal procento dalis apskaičiuota kokio medžiagų kiekio reikės. Vandens santykis išlaikytas toks pats kaip ir visų tyrimų metu $V/C=0,46$.

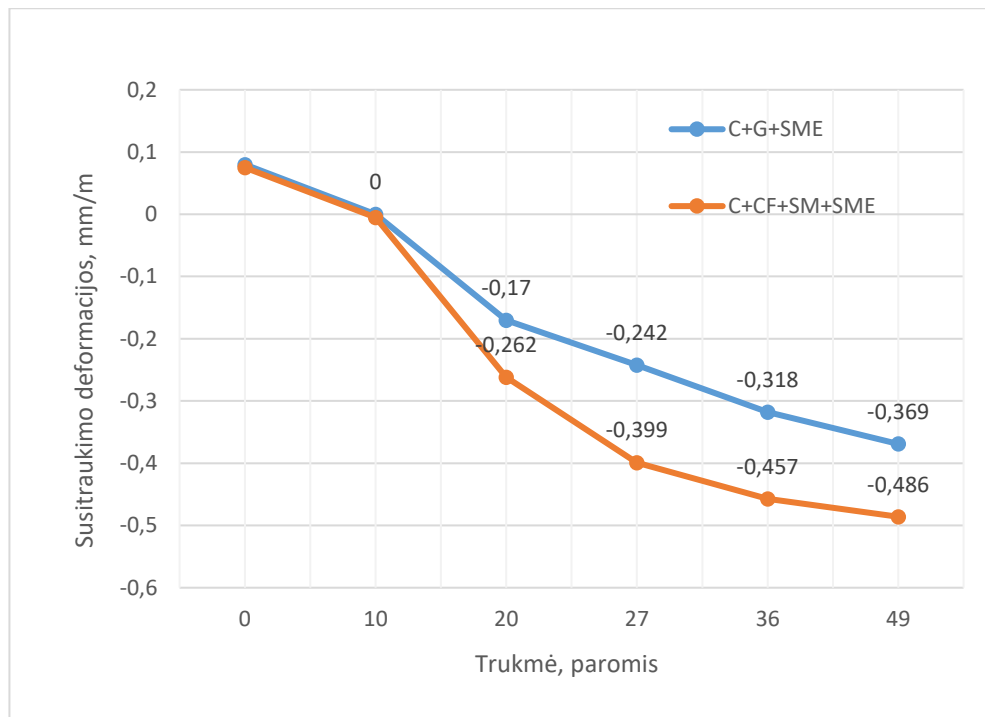
Sudėtis Nr.	Žymėjimas	Riškis 50%				Užpildas 50%
		Cemento kiekis, %	Kalcio formiato kiekis, %	Gipso kiekis, %	Smulkinto stiklo kiekis, % nuo cemento kiekio	Smėlis, %
1	C+G+SME	75	-	15	-	100
2	C+CF+SM+SME	65	15	-	10	100

Maišymo metu akivaizdžiai matėsi, kad rišimosi procesas bus lėtesnis, kadangi maišant tai buvo daug skystesnis mišinys, tačiau sudėjus į formas po 10min jau matėsi prasidėjęs rišimosi procesas.



33 pav. Betono stipris gniuždant ir lenkiant

Po 2sav. buvo išformuotas betonas ir atlikti gniuždymo ir lenkimo bandymai. Kaip ir tikėtasi stiprumas nėra didelis. Tikėtina, jog palikus šiuos bandinius kietėti ilgiau stiprumas būtų padidėjęs. Pagal gautus rezultatus [žiūrėti Pav. 33] betonas, kurio sudėtyje kalcio formiatas ir maltas stiklas stipris lenkiant 0,3 MPa, o stipris gniuždant yra 4 MPa didesnis.



34 pav. Betono deformacijų (susitraukimo) pokytis

Betono bandiniai taip pat buvo suformuoti ir susitraukimo tyrimui. Pirmieji matavimai atlikti po 10 kietėjimo parų. Didžiausia susitraukimo deformacija po 49 parų 0,486 mm/m betono, kurio sudėtyje buvo kalcio sulfato, malto stiklo ir cemento. Didžiausias pokytis įvyko po pirmųjų 10 parų. Lyginant su rišiklių deformacijomis taip pat didžiausias pokytis buvo po pirmosios savaitės., tačiau matuojant rišiklių susitraukimą [žiūrėti Pav. 34] didesnė deformacija buvo sudėtyje su gipsu. Iš šių deformacijų tyrimų galima teigti, kad kombinacijoje su smėliu gipso ir cemento rišiklis deformacijos labai panašios, tačiau priešingai yra cemento, kalcio formiato su maltu stiklu rišiklio atveju deformacija buvo mažesnė nei kartu su smėliu.

Atsparumo šalčiui nustatymas vienpusiu užšaldymu ir atšildymu

Atliekamas tyrimas pagal Lietuvos standartą LST 1428-29, temperatūra keičiama nuo -20°C iki $+20^{\circ}\text{C}$. Vienas ciklas 48 valandos, bandiniai įmerkiami į druskos tirpalą ir tuomet patalpinami į kamerą. Bandymas buvo atliekamas sudedant 5 bandinius, 3 iš šių yra rišikliai po 53 parų kietėjimo (C75+G15; C65+CF15+SM10; C65+CF15+SM10 – pakaitintas), kiti betono bandiniai po 49 parų kietėjimo (C+G+SME; C+CF+SM+SME). Visi 5 bandiniai po 3 ciklų pradėjo irti. , tačiau esančiuose sudėtyje su gipsu išliko tvirtesni lyginant su kalcio formiatu. Galima teigti, jog smėlis didelės įtakos šalčio tyrimui neturėjo, pagrindiniai skirtumai priklauso nuo mišinyje esančių priedų.



35 pav. Cementinio rišiklio bandiniai prieš ir po atsparumo šalčiui bandymo

Nuotraukose [žiūrėti Pav. 35] galima matyti, jog labiausiai suiręs bandinys C65+CF15+SM10 prieš suformuojant pakaitintas iki +30 °C.



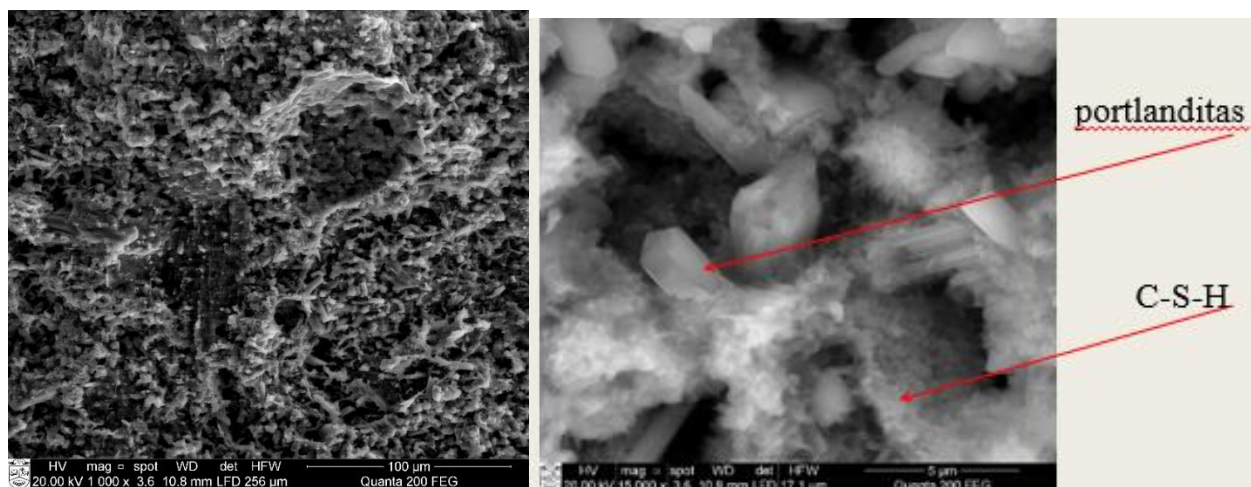
36 pav. Betono bandiniai prieš ir po atsparumo šalčiui bandymo

Betono bandiniai po šaldymo ciklo smarkiai suiro [žiūrėti Pav. 36]. Tačiau lyginant bandinius matyti, jog sudėtyje esant gipsui (C+G+SME) bandinys išliko tvirtesnis lyginant su antruoju bandiniu (C+CF+SM+SME), kai sudėtyje buvo kalcio formiatas.

Apibendrinant buvo nustatyta, jog tiek cementinis rišiklis, tiek betonas, kurio sudėtyje yra gipsas geriau atlaiko šalčio bandymą, negu sudėtyje esant kalcio formiatui. Siekiant rasti 3D spausdinimui tinkamo betono sudėtį ir norint, jog būtų medžiaga būtų ilgaamžiška reiktų atsižvelgti į šį eksperimentą, kad orinė rišamoji medžiaga – gipsas, šiuo atžvilgiu turi pranašumą.

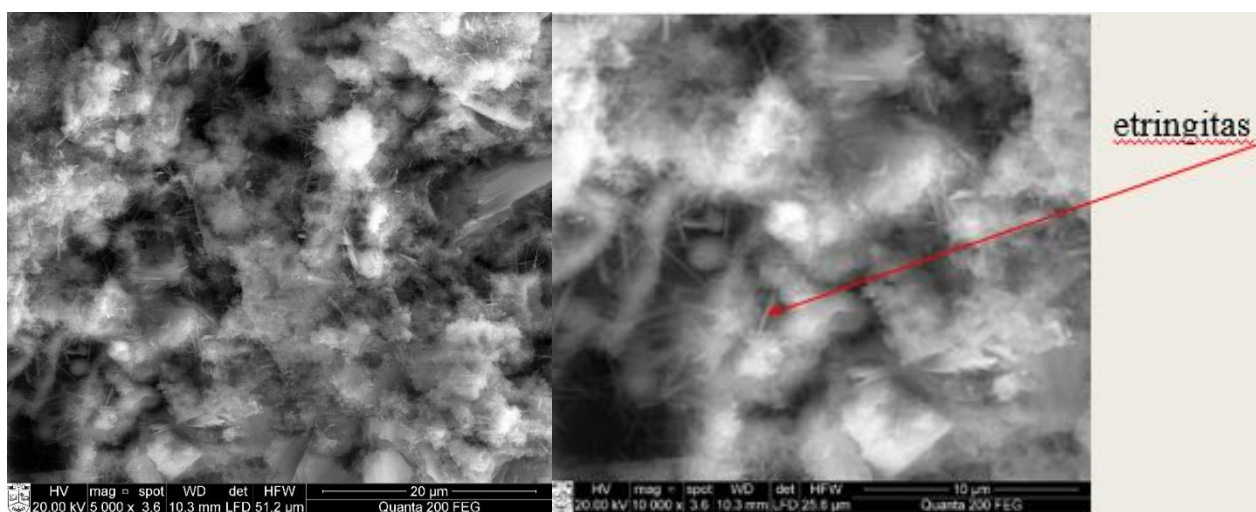
Struktūros analizė skenuojančiu elektroniniu mikroskopu

Atliekant mikroskopinės analizės tyrimą iš jau sukietėjusių bandinių buvo paimti kernai. Tirti dviejų skirtingų sudėčių bandiniai. 100% cementas (Pav. 3.13) ir 80% cemento, 20 % sulfatinio rišiklio bandinys (paveiktas 30s. ultragarsiniu dispergatoriumi) – kietėjimo trukmė 28 paros.



37 pav. Cementinio bandinio SEM nuotrauka

SEM nuotraukose galima matyti [žiūrėti Pav. 37) etaloninio cementinio bandinio struktūrą. Bandinį sudaro dideli kristalai vadinami portlanditu (kalcio hidroksido kristalai).



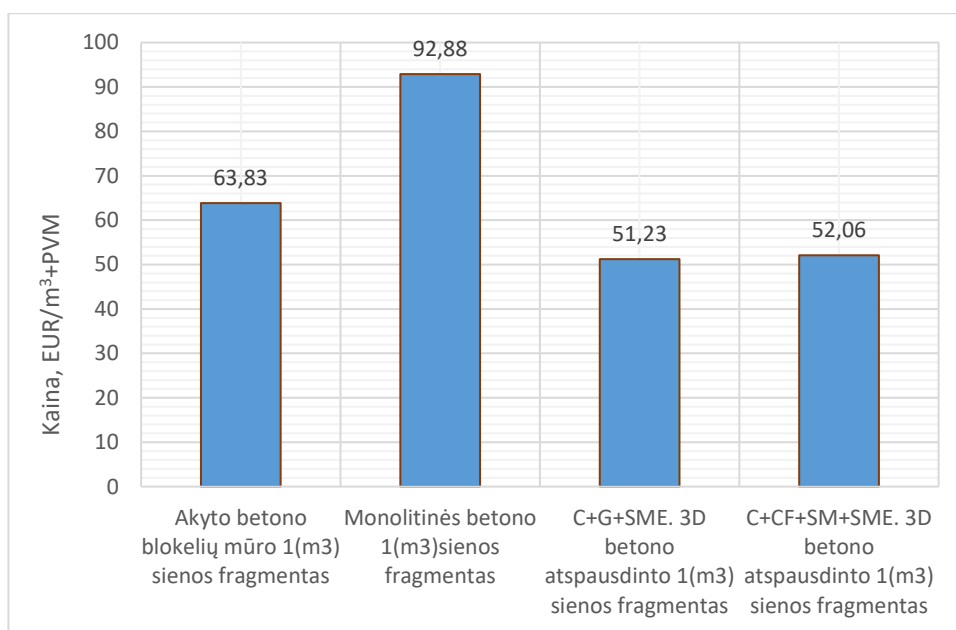
38 pav. Sulfatinio rišiklio (C80/G20) bandinio SEM nuotrauka

Sulfatinio rišiklio [žiūrėti Pav. 38] bandinio SEM nuotraukose galima matyti susidarančius adatos formos kristalus - etringitą. Nuotraukoje galima matyti kalcio hidrosilikatus, tai kietėjančio

portlandcemenčio dariniai. Taip pat kaip ir cementinio bandinio nuotraukose matomi portlanditas (kalcio hidroksido kristalai).

Ekonominis palyginimas

Atlikus tyrimus buvo nustatyta optimali betono sudėtis. Tam, kad būtų galima palyginti kainas buvo pasirinkti standartiniai sienos gamybos variantai: akyto betono blokelių (1 priedas) ir monolitinės sienos variacija (2 priedas). Kaina paskaičiuota 1m^3 pagal sąmatos programą „Sistela“. Kadangi sukurto 3D betono spausdintuvui tinkamo betono šioje programoje nėra kainos pasirinktos iš prekybos centruose pateiktų kainų. 3D spausdinimui tinkamo betono sudėtis ir apskaičiavimas pateikti prieduose (3 priedas).



39 pav. Kainų palyginimo grafikas

Pateiktos kainos yra nevertinant žmogaus darbo ir papildomų mechanizmų kainų, kadangi įvertinti 3D betono spausdintuvo kaštus yra sudėtinga. Pagal pateiktą grafiką [žiūrėti Pav. 39 galima matyti, kad brangiausias variantas būtų monolitinė siena, o mažiausia medžiagų kaina būtų 3D spausdinimui tinkamo betono. Galima daryti prielaidą, jog net vertinant mechanizmus ir žmogaus darbo išteklius medžiagų sąnaudos visgi būtų pigiausios spausdinant.

Išvados

1. Atlikus bandymus pagal išnagrinėtą literatūrą sukurtas naujas cementinis rišiklis su kalcio formiatu ir smulkintu stiklu.
2. Ištirta, kad gipso įtaka portlandcemenčio kietėjimo parametrams efektas yra staigus, tačiau po ilgesnio laiko mažiau efektyvus. Pasirinkta tyrimą atlikti su kalcio formiatu ir smulkintu stiklu, kadangi šių priedų pagal gautus rezultatus efektas buvo optimaliausias.
3. Pusiau adiabatinio kalorimetro metodu nustatyta, kad racionalus kiekis hidratacijos greitiklio sudėtyje (CEM I 42,5 R) turėtų būti - 15% kalcio formiato ir 10% smulkinto stiklo. Smulkintas stiklas yra amorfinis SiO₂ ir veikia kaip pucolaninis priedas. Kadangi tai yra perdirbtos stiklo duženos, tai sprendžiama ir ekologinė problema.
4. Nustatyta, kad cementinį rišiklį veikiant ultragarsu tiksliai 30s. padaromas teigiamas efektas rišimosi procesui.
5. Sukurto cementinio rišiklio fizikines ir mechanines savybes: gniuždomasis stipris po 14 parų kietėjimo 32,3 MPa, stipris lenkiant 5,3 MPa, susitraukimo deformacijos -0,321 mm/m.

Nustatyta, kad po 6 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų 3% NaCl tirpale, sudėtyje esant gipsui (C+G+SME) yra ilgaamžiškesnis lyginant kai sudėtyje buvo kalcio formiatas (C+CF+SM+SME. Betonai, kurio sudėtyje buvo kalcio formiatas labiau suirio- matyti žymių įtrukumų bei nubyreėjimų.

Literatūros sąrašas

1. GOSSELIM, G., DUBALLET, R., ROUX, P., GAUDILLIERE N., DIRRENBERGER, J. ir MOREL P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design* [interaktyvus]. Singapore: Elsevier. 2016, Vol. 100, p. 102-109. [žiūrėta 2017-12-17]. Prieiga per: Science Direct
2. PERROT, D. RANGEARD, A ir PIERRE, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques. *Materials and Structures* [interaktyvus]. Netherlands: Springer, 2016, Vol. 49, p. 1213–1220. [žiūrėta 2018-05-12]. ISSN: 1359-5997. Prieiga per: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-015-0571-0>
3. PANDA, Biranchi ir kiti. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters* [interaktyvus]. Paris: Elsevier 2017, Vol. 209, p. 146-149. [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per: Science Direct
4. B. ALMANGOUR, B., GRZESIAK, D., YANG, J.M. Nanocrystalline TiC-reinforced H13 steel matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting, *Mater. Key Engineering Materials*, [interaktyvus]. Szczecin, 2014, Vol. 586, p. 83-86. [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.586.83>
5. ALMANGOUR B. ir kiti. Rapid fabrication of bulk-form TiB₂/316L stainless steel nanocomposites with novel reinforcement architecture and improved performance by selective laser melting, *J. Alloys Compd*, [interaktyvus]. Elsevier 2016, 680, p. 480-493. [žiūrėta 2018-11-16]. Prieiga per: Science Direct
6. BOS, F. Ir kiti. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing, *Virtual and Physical Prototyping*, [interaktyvus]. 2016, Vol. 11, p. 209-225. [žiūrėta 2018-11-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
7. DUBALLETA, R., BAVERELA., DIRRENBERGERB, O. Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction*, [interaktyvus]. Paris: Elsevier 2017, Vol. 83, p. 247-258. [žiūrėta 2018-11-16]. Prieiga per: Science Direct
8. NI, H.-G. ir WANG, J.-Z. Prediction of compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. [interaktyvus]. Bangladesh, 2011. [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per: DOI:10.13140/RG.2.1.3270.7684

9. HAMBACH, M. ir VOLKMER, D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*, [interaktyvus]. Elsevier 2017, Vol 79, p. 62-70. [žiūrėta 2017-12-12]. Prieiga per: Science Direct
10. *DTI: 3D Concrete Printing - from material design to extrusion* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2018-11-15]. Prieiga per: <https://www.dti.dk/projects/3d-printed-buildings/36993>
11. ZOLLO, R.. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, [interaktyvus]. Elsevier 1997, Vol. 19, p. 107-122. [žiūrėta 2018-11-16]. Prieiga per: Science Direct
12. *SPECAVIA: Строительная 3D печать. Смеси. Практические рекомендации.* 2016 [žiūrėta 2018-11-15]. Prieiga per: <https://specavia.pro/articles/Stroitelnaja-3D-pechat-Smesi-Prakticheskie-rekomendacii/>
13. VAITKEVIČIUS, V., ŠERELIS, E., KERŠEVICIUS, V. Effect of ultra-sonic activation on early hydration process in 3D concrete printing technology. *Construction and Building Materials*, [interaktyvus]. Oxford: Elsevier. 2018, Vol. 169, p. 354-363. Prieiga per: Science Direct
14. *VEDRANA: Mineralinės rišančios medžiagos* [2018-11-15]. Prieiga per: https://www.vedrana.lt/naudinga_informacija_rysamosios_medziagos/
15. GURSKIS, V. *Statybinės medžiagos: mokomoji knyga*, [interaktyvus]. Kaunas: Ardiva, 2008. ISBN 978-9955-896-24-1. Prieiga per: http://vuzf.asu.lt/wp-content/uploads/sites/6/2015/01/statybines_medziagos.pdf
16. SHEN, B., HUBLER, M., PAULINO, G.H., STRUBLE, L.J. Functionally-graded fiberreinforced cement composite: processing, microstructure, and properties. *Cement and Concrete Composites*. [interaktyvus]. Elsevier 2008 Vol. 89, p. 80-86. [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per: Science Direct
17. HAMBACH, M. MOLLER, H., NEUMANN, T., VOLKMER, D. Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (> 100 MPa), *Cement and Concrete Research*, [interaktyvus]. Elsevier 2016 Vol. 30, p. 663-673. [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per: Science Direct
18. LE, T.T. ir kiti. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, [interaktyvus]. Oxford: Elsevier. 2012, Vol. 42, p. 558-566. [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per: Science Direct

19. MANOLIS, S. L. 3D printers lead growth of rapid prototyping. *Plastics Technology*, [interaktyvus]. 2004 [žiūrėta 2018-11-15]. Prieiga per: <https://www.ptonline.com/articles/3d-printers-lead-growth-of-rapid-prototyping>
20. AUFRAY, N., DIRRENBARGER, J., ROSI, G. A complete description of bi-dimensional anisotropic strain-gradient elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, [interaktyvus]. Elsevier 2015, Vol. 69-70, p. 195-206. [žiūrėta 2018-11-20]. Prieiga per: Science Direct
21. BOUAZIZ, O., BRÉCHET, Y., EMBURY, J.D. Heterogeneous and architected materials: a possible strategy for design of structural materials, *Advanced engineering materials*. [interaktyvus]. 2008, Vol. 10, p. 24-36. [žiūrėta 2018-11-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/adem.200700289>
22. BRÉCHET, Y. ir Embury, J.D. Architected materials: expanding materials space. *Scripta Materialia*, [interaktyvus]. Elsevier 2013, Vol. 68, p. 1-3. [žiūrėta 2018-11-22]. Prieiga per: Science Direct
23. GREGURIC, L. How Much Does a 3D Printed House Cost in 2018? *One Large Deposit*. [2018-11-15]. Prieiga per: <https://all3dp.com/2/how-much-does-a-3d-printed-house-cost-in-2018/>
24. CESARETTI, G. ir kiti. L. Pambaguian, Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*. Elsevier, [interaktyvus]. 2014, Vol. 93, p. 430-450. [žiūrėta 2018-11-22]. Prieiga per: Science Direct
25. DIRRENBARGER, J. ir kiti. Elastoplasticity of auxetic materials, *Computational Materials Science*, [interaktyvus]. Elsevier 2012, Vol. 64, p. 57-61. [žiūrėta 2018-11-28]. Prieiga per: Science Direct
26. J. DIRRENBARGER, J. FOREST, S. ir JEULIN, D. Effective elastic properties of auxetic microstructures: anisotropy and structural applications. *Mechanics and Materials in Design*, [interaktyvus]. Springer 2013, Vol. 9, p. 21–33. [žiūrėta 2018-11-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10999-012-9192-8>
27. GAROFALO, F. The world's first 3D-printed office building is in Dubai. *Lifegate*. [2017-11-15]. Prieiga per: <https://www.lifegate.com/people/lifestyle/worlds-first-3d-printed-office-building-dubai>

28. LST EN 12390-4:2003. *Betono bandymas. 4 dalis. Stipris gniuždant. Bandymo mašinų techniniai reikalavimai.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003.
29. LST EN 206:2013+A1:2017 *Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis: Lietuvos standartas.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017.
30. LST EN 196-9:2010. *Cemento bandymų metodai. 9 dalis. Hidratacijos šiluma. Pusiau adiabatiniis metodas. Lietuvos standartas.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2010.
31. LST EN 12390-7:2009 *Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis: Lietuvos standartas.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
32. LST EN 12390-5:2009/P:2011. *Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris. Lietuvos standartas.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011
33. LST EN 12390-3:2009 „*Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris: Lietuvos standartas.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009
34. LST EN 12617-4:2003. *Betoninių konstrukcijų apsauginiai ir remontiniai produktai bei sistemos. Bandymo metodai. 4 dalis. Susitraukimo ir išsiplėtimo nustatymas. Lietuvos standartas.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003.
35. LST 1428-19:2016 „*Betonas. Bandymo metodai. 19 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas vienu puse užšaldymu ir atšildymu: Lietuvos standartas.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.

Priedai

1 priedas

Monolitinė sienos 1m³ kaina

LOKALINĖ ŠAMATA

Sudaryta pagal 2016.10 kainas

Statinių grupė **A999 999**

Statinsys **Monolitinė siena**

2018-12-12

Suma žiniaraščiui **0.00 EUR**

Sąm. eil.	Darbų ir išlaidų aprašymai	Mato vnt	Kiekis	Kaina EUR	Iš viso EUR
--------------	-------------------------------	-------------	--------	--------------	----------------

999 999

1 1 (D.užm.)

1	F6-1-4 Monolitinės betono 200 mm storio sienos, naudojant "Peri" klojinius k9=1.15 (d.san=8.1)	m3	1,0	5,25	42,53
---	--	----	-----	------	-------

Skyriuje 1 42,53

žiniaraštyje 999 42,53

Sezoniniai darbai

Specifiniai darbai

Papildomas darbo užmokestis

Soc.draudimo išlaidos

Viso darbo užmokestis: 42,53

Medžiagos

320	Betono mišiniai	m3	1,02	72,67	74,12
914-1	Specialus skystis klojiniams tepti (Peri) 'Bio Clean'	l	0,25	3,91	0,98
966-1	Peri' klojiniai 'Trio'	m2	0,035	507,91	17,78
				Viso:	92,88

Papildomų medžiagų vertė

Viso medžiagos: 92,88

Mechanizmai

48130	Autokranai iki 10 t kėlimo galios	maš.val	1,34	23,34	31,28
48382	Kiti smulkūs mechanizmai	maš.val	0,5	0,49	0,25
				Viso:	31,53

Papildomų mechanizmų vertė

Viso mechanizmai: 31,53

Statybvietės išlaidos

Pridėtinės išlaidos

Pelnas

Pridėtinės vertės mokestis

Iš viso žiniaraštyje 999

166,94

Sudarė :

/Pavardė/

Akyto betono blokelių mūro sienos 1m³ kaina

LOKALINĖ SAŲATA

Sudaryta pagal 2016.10 kainas

Statinių grupė A999 999

Statinys Akyto betono blokelių mūras

2018-12-12

Suma žiniaraščiui 172.05 EUR

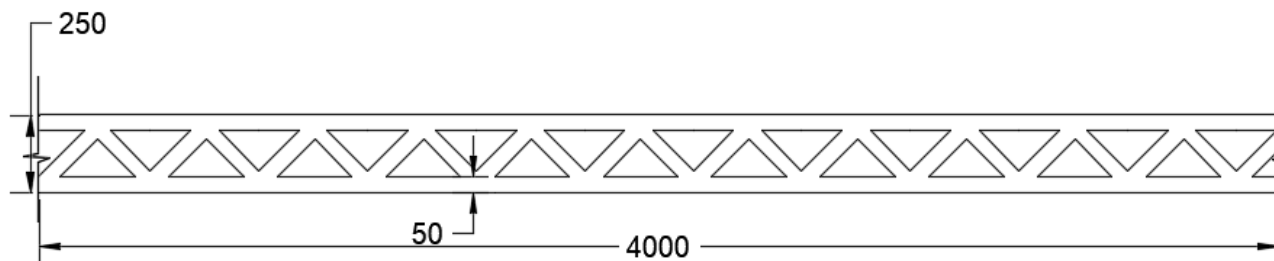
Sąm. eil.	Darbų ir išlaidų aprašymai	Mato vnt	Kiekis	Kaina EUR	Iš viso EUR
888 888					
88 88 (D.užm.)					
1	F8-1-29 Akyto betono blokelių mūras, klijuojant k8=1.12, k9=1.15 (d.san=4.9)	m3	1,0	5,13	25,14
Skyriuje 88					25,14
žiniaraštyje 888					25,14
	Sezoniniai darbai 15.00% (25.14)				3,77
	Specifiniai darbai 17.00%				3,02
	Papildomas darbo užmokestis 8.00%(25.14+3.77+3.02)				2,55
	Soc.draudimo išlaidos 31.00%(25.14+3.77+3.02+2.55)				10,69
				Viso darbo užmokestis:	45,17
Medžiagos					
311	Akyto betono blokai	m3	1,0	60,58	60,58
363-8	Akytbetonio blokų mūrijimo mišiniai 'Kreisel DS'	kg	25,0	0,13	3,25
				Viso:	63,83
	Papildomų medžiagų vertė 3.00%				1,91
				Viso medžiagos:	65,74
Mechanizmai					
48130	Autokranai iki 10 t kėlimo galios	maš.val	0,16	23,34	3,73
				Viso:	3,73
	Papildomų mechanizmų vertė 3.00%				0,11
				Viso mechanizmai:	3,84
	Statinio statybos išlaidos	Viso:	45,17	65,74	3,84
	Statybvietės išlaidos 9.00%				10,33
	Iš viso tiesioginės išlaidos				125,08
	Pridėtinės išlaidos 30.00%(25.14+3.77+3.02+2.55)				10,34
	Pelnas 5.00%(125.08+10.34)				6,77
	Iš viso netiesioginės išlaidos				17,11
				Bendra vertė be PVM	142,19
	Pridėtinės vertės mokestis 21.00%				29,86
				Bendra vertė su PVM	172,05

Sudarė :

/Pavardė/

1m³ sienos kaina naudojant 3D betono spausdinimo technologiją.

Pasirenkamas standartinis sienos fragmentas paskaičiuoti reikiamo betono kiekio 1m³ sienos.



Pagal atliktus bandymus paskaičiuotas reikiamas kiekis medžiagų šiam sienos fragmentui.

Sudėtis	Kiekis į 1m ³ sienos (kg)	Kaina (eur/kg+pvm)	1m ³ sienos kaina (EUR)
Portlandcementis	63,10	0,1900	11,99
Gipsas	420,90	0,0900	37,88
Smėlis	484,00	0,0028	1,36
Suma:			51,23
Portlandcementis	63,1	0,028	1,77
Kalcio formiatas	42,1	0,26	10,95
Smulkintas stiklas	420,9	0,09	37,88
Smėlis	526,1	0,0028	1,47
Suma:			52,07

Kainos prekybos centruose pateikiamų kainininkų. Lentelėje pateiktos apskaičiuotos kainos reikiamam medžiagų kiekiui.