



**Kauno technologijos universitetas**  
Statybos ir architektūros fakultetas

**„Žaliojo betono“ struktūros, savybių ir panaudojimo 3D  
spausdinimo technologijoje tyrimai bei konstrukcinė analizė**  
Baigiamasis magistro krypties studijų projektas

---

**Povilas Pečiukonis**  
Projekto autorius

**Prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **„Žaliojo betono“ struktūros, savybių ir panaudojimo 3D spausdinimo technologijoje tyrimai bei konstrukcinė analizė**

Baigiamasis magistro krypties studijų projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Povilas Pečiukonis**

Projekto autorius

**Prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius**

Vadovas

**Doc. dr. Audrius Grinys**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Povilas Pečiukonis

## **„Žaliojo betono“ struktūros, savybių ir panaudojimo 3D spausdinimo technologijoje tyrimai bei konstrukcinė analizė**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Povilo Pečiukonio, baigiamasis projektas tema „„Žaliojo betono“ struktūros, savybių ir panaudojimo 3D spausdinimo technologijoje tyrimai bei konstrukcinė 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)

Pečiukonis Povilas. „Žaliojo betono“ struktūros, savybių ir panaudojimo 3D spausdinimo technologijoje tyrimai bei konstrukcinė analizė. Magistro krypties studijų baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: *3D spausdinimas, becementis betonas, lakieji pelenai, kalkės, ekologija, CO<sub>2</sub>*.

Kaunas, 2020. 47 p.

## Santrauka

Magistro krypties studijų baigiamojo projekto tikslas yra ištirti bei rasti optimaliausią becemėčio betono sudėtį, tinkamą naudoti 3D spausdinimo technologijoje. Darbas susideda iš teorinės ir eksperimentinės dalių.

Teorinėje dalyje nagrinėjama ekologijos svarba, CO<sub>2</sub> išskyrimo mažinimas bei antrinis medžiagų panaudojimas, tokių kaip šlakas, lakieji pelenai bei stiklas. Apžvelgta becemėčio betono panaudojimas statybose, bei 3D spausdinimo technologijos raida.

Eksperimentinėje dalyje atlikta becemėčio rišiklio eksperimentas. Išbandyta lakiųjų pelenų, kalkių bei malto stiklo įvairios kompozicijos ir atrasta tinkamiausia sudėtis. Geriausiai keliamus reikalavimus atitiko bei didžiausiu stiprumu pasižymėjo bandinys sudarytas iš smėlio, skysto stiklo, malto stiklo, lenkiškų lakiųjų pelenų bei vandens. Baigiamajame darbe taip pat atliktas laiko tarpo tarp dviejų betono sluoksnių paklojimo įtakos betono stiprumui tyrimas. Rezultatai atskleidė, kad 15 minučių laiko tarpas įtakos stiprumui neturėjo. Papildomai atlikta 3D spausdintuvu atspausdintų sienų konstrukcinė analizė. Buvo išnagrinėta trys populiariausių skerspjuvių sienos: trikampė, vingiuota bei kompozitinė siena su gelžbetoninių kolonų intarpais. Didžiausiu standumu pasižymėjo spausdinta siena su kolonų intarpais.

Baigiamąjį darbą sudaro 4 dalys: įvadas, literatūros apžvalga ir analizė, eksperimentinė dalis bei išvados. Taip pat darbe pateikta 6 vnt. lentelių, 38 vnt. paveikslėlių, 35 vnt. literatūros ir šaltinių.

Pečiukonis Povilas. The „Green Concrete” Properties and the Use of 3D Printing Technology and Structural Analysis. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering, Civil Engineering (E05).

Keywords: *3D printing, green concrete, fly ash, lime, ecology, CO<sub>2</sub>*.

Kaunas, 2020. 47 p.

### **Summary**

The aim of master`s thesis is to explore and find the most efficient composition of green concrete for 3D printing technology. Master`s thesis consists of theoretical and experimental parts.

In the theoretical part the need of ecology was explored, reduction of CO<sub>2</sub> emission, slag, fly ash, and glass took part as recycle materials. Also made a review about the use of green concrete in constructions and development of 3D printing technology.

In the experimental part green concrete binder experiment was made. Fly ash, lime, and ground glass were mixed in a different composition to find the best one. The sample made of sand, liquid glass, ground glass, polish fly ash and water fulfilled all requirements and represented highest compression strength. In master`s thesis the influence on concrete strength of time gap between applying two concrete layers experiment was made. Results revealed that time gap of 15 minutes had no influence on concrete strength. Additionally, structural analysis of 3D printed walls was made. Three most popular cross-sections were investigated: triangle, winding line and composite of triangle wall with reinforced concrete columns. Composite wall with reinforced concrete columns represented highest stiffness value.

The master thesis consists of 4 parts: Introduction, analysis and review of literature, experimental part and conclusions. Also, 6 pcs of tables, 38 pcs of pictures, 35 pcs of references were submitted.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Literatūros apžvalga ir analizė.....</b>	<b>12</b>
1.1. Pasauliniai moksliniai pasiekimai 3D betono spausdinimo technologijoje .....	12
1.1.1. Užsienyje įvykdyti 3D betono spausdinimo projektai.....	12
1.1.2. Geopolimerinio betono panaudojimas statybose.....	14
1.2. Lietuvos moksliniai pasiekimai 3D betono spausdinimo technologijoje.....	14
1.3. Polimeriniai rišikliai .....	15
1.4. Geopolimerinės medžiagos .....	15
1.5. 3D spausdinimui naudojamas be cementis betonas.....	17
1.6. Laiko tarpo tarp dviejų betono sluoksnių paklojimo įtaka betono tempiamajam stipriui .....	18
1.7. Literatūros analizės rezultatai .....	20
<b>2. Eksperimentinė dalis .....</b>	<b>21</b>
2.1. Tyrimo objektas, tikslas ir uždaviniai .....	21
2.2. Tyrimams naudotos medžiagos ir jų savybės .....	21
2.2.1. Lakieji pelenai .....	21
2.2.2. Skystas stiklas.....	21
2.2.3. Kalkės .....	22
2.2.4. Maltas stiklas .....	22
2.2.5. Maltas kvarcinis smėlis .....	22
2.2.6. Cementas .....	22
2.2.7. Gipsas .....	23
2.2.8. Vanduo .....	23
2.3. Tyrimų metodai .....	23
2.3.1. Reglamentavimas .....	23
2.3.2. Mišinių maišymas.....	24
2.3.3. Fizikinių savybių nustatymas .....	24
2.3.4. Mechaninių savybių nustatymas.....	25
2.3.5. Lenkiamojo stiprio nustatymas.....	26
2.3.6. Kietinimo procedūra.....	27
2.4. Becemenčio rišiklio eksperimentas .....	27
2.5. Laiko tarpo tarp dviejų betono sluoksnių paklojimo įtaka betono stiprumui.....	32
2.6. 3D robotu atspausdintų sienų skerspjūvio konstrukcinė analizė .....	36
2.6.1. Konstrukcinės analizės rezultatai .....	40
<b>Išvados .....</b>	<b>44</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>45</b>

## Lentelių sąrašas

<b>2.1 lentelė</b> Bandinių sudėtys .....	28
<b>2.2 lentelė</b> Sudėčių aprašymai.....	28
<b>2.3 lentelė</b> Rišklio vizualinis vertinimas bei pastabos .....	28
<b>2.4 lentelė</b> Cementinio betono sudėtis .....	33
<b>2.5 lentelė</b> Becemenčio betono sudėtis .....	33
<b>2.6 lentelė</b> Bandinių suskirstymas.....	33

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b>	3D betono spausdinimo technologijos komponentai.....	10
<b>2 pav.</b>	Pirmasis 3D spausdintuvu atspausdintas gyvenamųjų namų kvartalas Kinijoje.....	12
<b>3 pav.</b>	Danų kompanijos „3D Printhuset“ spausdintuvas. ....	13
<b>4 pav.</b>	Pirmasis pilnai funkcionuojantis ofisas Dubajuje, atspausdintas 3D spausdintuvu.....	13
<b>5 pav.</b>	Klimato kaitos institutas Australijoje, 2013 m. Pastatytas iš geopolimerinio betono.....	14
<b>6 pav.</b>	3D spausdintuvas spausdina betono karkasą laboratorijoje [8].....	15
<b>7 pav.</b>	Geopolimerizacijos reakcija .....	16
<b>8 pav.</b>	Medžiagos sudėtis 3D becemenčio betono spausdinimui .....	17
<b>9 pav.</b>	Elektroniniu skenuojančiuoju mikroskopo rezultatai. a - lakieji pelenai. b - šlakas.....	17
<b>10 pav.</b>	Rentgenografinė analizė .....	18
<b>11 pav.</b>	Galimos nesukibusio betono atsiradimo vietos .....	19
<b>12 pav.</b>	Laiko tarpo tarp dviejų betono sluoksnių paklojimo įtaka sukibimui (skeliamoji galia $R_{tt}$ )	19
<b>13 pav.</b>	Betono maišyklė „Automix“ .....	24
<b>14 pav.</b>	Svarstyklės „KERN PCB“.....	24
<b>15 pav.</b>	Hidraulinis presas „Toni Technik 2020“ gniuždomajam stipriui nustatyti.....	25
<b>16 pav.</b>	Hidraulinis presas „Toni Technik 2020“ lenkimo bandymams atlikti .....	26
<b>17 pav.</b>	Bandinių džiovyklė .....	27
<b>18 pav.</b>	Bandiniai: 1-as, 2-as ir 3-ias.....	29
<b>19 pav.</b>	Bandiniai: 4-as, 5-as ir 6-as .....	30
<b>20 pav.</b>	Bandiniai: 7-as, 8-as bei 9-as .....	31
<b>21 pav.</b>	Rišiklio gniuždomojo stiprio rezultatai .....	32
<b>22 pav.</b>	Bandinių tankiai .....	34
<b>23 pav.</b>	Bandinių gniuždomųjų ir lenkiamųjų stiprių palyginimas.....	34
<b>24 pav.</b>	Becemenčio betono bandinys suformuotas sluoksniais .....	35
<b>25 pav.</b>	Cementinio betono bandinys suformuotas sluoksniais .....	35
<b>26 pav.</b>	Apskritos formos siena.....	37
<b>27 pav.</b>	Bandyme naudotos medžiagos specifikacija.....	37
<b>28 pav.</b>	Skaičiuojamoji schema.....	38
<b>29 pav.</b>	Konstruktinėje analizėje naudotų apkrovų derinių sąrašas.....	39
<b>30 pav.</b>	Konstruktinėje analizėje naudotų apkrovų sąrašas .....	39
<b>31 pav.</b>	„Trikampės“ formos sienos skerspjūvis .....	40
<b>32 pav.</b>	„Vingiuotos“ formos sienos skerspjūvis .....	40
<b>33 pav.</b>	„Trikampės“ formos sienos skerspjūvis su gelžbetoninėmis kolonomis .....	40
<b>34 pav.</b>	Absoliučių deformacijų vertinimo skalė .....	41
<b>35 Pav.</b>	„Trikampės“ skerspjūvio formos sienos deformacijos .....	41
<b>36 Pav.</b>	„Vingiuoto“ skerspjūvio formos sienos deformacijos .....	42
<b>37 pav.</b>	„Trikampės“ skerspjūvio formos sienos su gelžbetoninėmis kolonomis deformacijos .....	42
<b>38 pav.</b>	Atramų reakcijų rezultatai .....	43



## Įvadas

Šiais laikais tradicinė statyba, kuri reikalauja labai daug žmogaus darbo jėgos ir laiko resursų, gali būti pakeista robotizuota statyba. Darbo laikas statybos aikštelėje gerokai sutrumpės, statybinių atliekų ir nepanaudotų resursų kiekis sumažės, bei taupant žmogaus darbo jėgą kartu sumažės ir klaidos tikimybė. Visa tai statybose jungia 3D spausdinimo technologija.

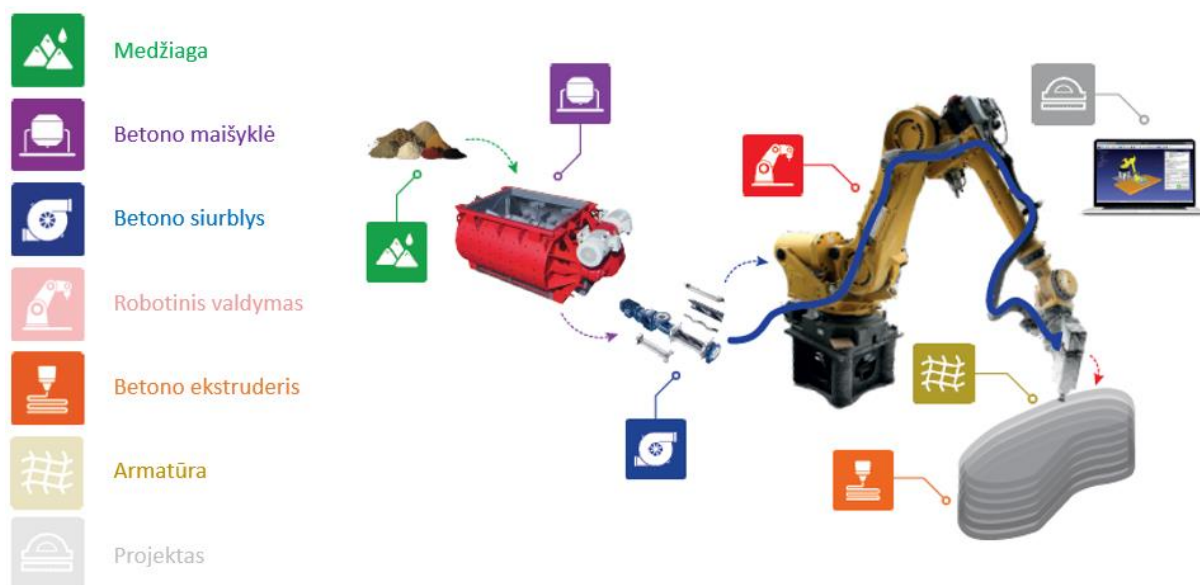
Pati 3D spausdinimo technologija nėra visiškai naujas išradimas. Jau 1980 m. japonų mokslininko dr. H. Kodama buvo išrasta įranga ir medžiagos skirtos adityviajai gamybai (angl. *additive manufacturing*) [1]. Taip pat buvo patentuoti du adityviosios gamybos metodai, skirti trijų dimensijų plastikinių modelių su fotokietinančiu termoreaktyviu polimeru gamybai [2]. Kiek vėliau ši technologija buvo integruota į maisto pramonę, automobilių dalių kūrimą, elektroniką ir netgi mediciną. 1999 metais buvo išties svarbūs medicinoje – 3D spausdintuvu atspausdinti organai sėkmingai implantuoti į žmogaus kūną (kraujagyslės, inkstai, protezai) [3].

Pirmaisiais atradimų metais buvo koncentruotasi į smulkesnių modelių kūrimą. Tokių, kuriems reikia didelio preciziškumo bei detalumo. Tik vėliau pradėta spausdinimui naudoti didesnio mastelio spausdintuvus bei įvairesnes medžiagas. Statybos pramonėje yra išskiriami trys pagrindiniai spausdinimo metodai [4]:

1. ekstrudinis (betonas/cementas, vaškas, putos, polimerai);
2. tiesioginis miltelinis rišimas (angl. *powder bonding*);
3. adityvusis virinimas (angl. *additive welding*).

Statybos pramonėje plačiausiai naudojamas ekstrudinis spausdinimo būdas. Pagrindiniai komponentai, reikalingi spausdinimui, yra šie: medžiaga, betono maišyklė, betono siurblys, robotinis valdymas, betono ekstruderis, armatūra, projektas (1 pav.). Tai tarpdisciplininė technologija. Norint ją įgyvendinti reikalingi automatikos, informatikos bei statybų srities specialistai. Pastarieji turi užtikrinti, kad naudojama medžiaga būtų tinkama spausdinti. Taigi, medžiaga turi pasižymėti šiomis savybėmis:

- tinkama konsistencija (vandens kiekis griežtai apibrėžtas, medžiaga turi būti nei per skysta nei per sausa);
- ypač mažu arba nuliniu sklidimu (išlietas betono sluoksnis turi išlaikyti savo formą);
- pradiniu stiprumu šviežiame betone (medžiaga, esanti šviežios fazės turi atlaikyti papildomų sluoksnių svorį iki betono rišimosi pradžios);
- trumpu rišimosi laiku (norint vykdyti nepertraukiamą statybą, medžiaga turi pradėti rištis po 10–15 min.).



**1 pav.** 3D betono spausdinimo technologijos komponentai

Labai svarbu, kad šviežias betonas pasižymėtų šiomis savybėmis, nes priešingu atveju medžiaga gali greitai sukietėti rezervuare, tiekimo žarnose ar būti netinkamų savybių ir norimo rezultato gauti nepavyks.

Šiomis dienomis ypač aktuali problema yra aplinkos užterštumas, šiukšlės ir ypač anglies dvideginio (CO<sub>2</sub>) išskyrimas į aplinką. Kaip žinia, gaminant portlandcementį, dažniausiai naudojamą betono rišamąją medžiagą, naudojamas technologinis procesas, reikalaujantis 1400 °C temperatūroje išdegti žaliavą ir taip gauti klinkerį, reikalingą cemento gamybai [6]. Deginimo procese išskiriamas didelis kiekis anglies dvideginio dujų. Remiantis šaltiniais yra žinoma, kad norint pagaminti 1 toną portlandcemenčio, į aplinką yra išskiriama apie 0,94 t CO<sub>2</sub> [14]. Šią problemą galima išspręsti portlandcementį pakeičiant kita rišamąją medžiaga, tokia kaip stiklas, lakieji pelenai ar šlakas. Tokiu atveju pagamintas betonas bus vadinamas becemenčiu betonu arba – „žaliuoju betonu“.

3D spausdinimo technologijai skirti kompoziciniai mišiniai pasižymi itin didele veiksmų, nuo kurių priklauso fizikinės ir mechaninės savybės, gausa. Modifikuoti mišiniai yra daugiadispersinė kompozicinė medžiaga, kurios fizikinius ir cheminius procesus sistemose nulemia tarpusavio veiksniai: mineralinė rišamoji medžiaga, polimerų įmaišos, modifikuojančios įmaišos, užpildai, ir kt. Gautiems specialios paskirties kompoziciniams mišiniams dažnai negalioja bendrieji kompozitų mechanikos dėsniai, kai kompozitinės medžiagos fizikinės savybės vertinamos pagal sudedamųjų komponentų tūrio ar masės dalis. Taip pat 3D spausdinimo technologijai skirtų kompozicinių mišinių gamyboje bus mažiau naudojama cemento ir natūralių užpildų, naudojamos pramonės atliekos, taip tausojant aplinką ir mažinant CO<sub>2</sub> išsiskyrimą, be to, šie kompozitai pasižymės naujomis savybėmis.

Europos Sąjungoje ypač didelis dėmesys skiriamas aplinkos apsaugai, tuo pačiu ir atliekų tvarkymo problemoms spręsti. ES pasirinkta ambicinga atliekų tvarkymo strategija, bet tuo pačiu aiškiai suformuluotas tikslas, bendrieji principai, uždaviniai ir keliai, kaip juos įgyvendinti. Lietuva, kaip ES narė, taip pat priėmė savo šalies atliekų tvarkymo strategiją. Strategijos tikslas – sukurti racionalią atliekų tvarkymo sistemą, tenkinančią visuomenės poreikius, užtikrinančią gerą aplinkos apsaugos kokybę ir nepažeidžiančią rinkos ekonomikos.

Aplinkos taršos prevencija bus vykdoma ne vien kenksmingų dujų išskyrimo mažinimu, bet ir antrinių žaliavų panaudojimu betono gamyboje. Pavyzdžiui, gamtoje surinktas stiklas, kuris nėra tinkamas antrą kartą panaudoti, gali būti sėkmingai integruotas į „žaliojo betono“ sudėtį. Taip pat po gamybos proceso likusieji lakieji pelenai bei aukštakrosnių šlakas gali būti panaudotas betono gamyboje. Tokie betonai yra vadinami geopolimeriniais betonais.

## 1. Literatūros apžvalga ir analizė

### 1.1. Pasauliniai moksliniai pasiekimai 3D betono spausdinimo technologijoje

#### 1.1.1. Užsienyje įvykdyti 3D betono spausdinimo projektai

Praktiniai pritaikymai pasaulinėje statybos 3D spausdinimo srityje prasidėjo jau nuo 2013 metų. Tuomet mokslininkai iš Olandijos tikslino statybinės medžiagos parametrus ir ieškojo geriausios sudėties. Amsterdamas ketino būti miestu, kuriame bus atspausdintas pirmasis komercinės paskirties namas pasaulyje [9]. Tačiau 2014 metais Kinijos kompanija „WinSun“ atspausdino 10-ties namų kvartalą per vieną parą (2 pav.). Šiam tikslui buvo naudojami keturi 3D spausdintuvai. Kurie yra 10 metrų ilgio bei 6,6 metrų pločio. Gamykloje buvo atspausdinti namo segmentai ir statybos aikštelėje surenkami į vieną statinį. Kaip gamintojas teigia, tokio namo kaina yra 5000 \$ [10].



**2 pav.** Pirmasis 3D spausdintuvu atspausdintas gyvenamųjų namų kvartalas Kinijoje

Šiuo metu yra sukurtas sąrašas statybose naudojamų spausdintuvų, kuriuos galima nusipirkti. Jame yra 16 spausdintuvų iš viso pasaulio [11]. Vieni pasižymi mobilumu, dideliu greičiu, o kiti savo dydžiu bei galimybėmis pastatyti pastatą iki 45 metrų ilgio, 12 metrų pločio bei 10 metrų aukščio (3 pav.). Šį spausdintuvą sukūrė Danų kompanija „3D Printhead“. Šis įrenginys išskirtinis tuo, kad pastatą gali pastatyti naudojant nepertraukiamo spausdinimo metodą bei nebereikės surinkinėti segmentų norint gauti atitinkamo dydžio statinį.



**3 pav.** Danų kompanijos „3D Printhuset“ spausdintuvas.

Jungtiniai Arabų Emyratai taip pat neatsilieka šios technologijos vystymosi etape. Dubajus tapo pirmuoju miestu, kuriame 3D spausdintuvu atspausdintas pilnai funkcionuojantis ofisas (4 pav.). Statybos buvo pilnai užbaigtos 2016 metais. Bendras visų statinių plotas siekia 250 m<sup>2</sup>. Kaip ir kvartalas atspausdintas Kinijoje, taip ir Dubajuje pastatytam ofisui buvo pritaikytas metodas spausdinti statinių segmentus gamykloje ir surinkti statybos aikštelėje. Pats spausdinimo procesas užtruko 17 dienų, o surinkimas – 2 dienas. Oficialiai teigiama, kad statinių kaina siekia 140 tūkst. \$ [12].



**4 pav.** Pirmasis pilnai funkcionuojantis ofisas Dubajuje, atspausdintas 3D spausdintuvu.

Dubajus – miestas, sukuriantis erdves technologijų pažangai bei žmonių gyvenimo gerovei. Tai dar kartą įrodė Jungtinių Arabų Emyratų vice prezidentas ir premjeras bei Dubajaus šeichas M. bin Rashid Al Maktoum paskelbdamas, kad iki 2025 metų Dubajuje bus 25% namų pastatytų naudojantis 3D spausdinimo technologija. Šis miestas siekia tapti 3D spausdintų namų sostine. Pagrindinė vizija, grindžianti šį teiginį, yra siekis kiekvieną šeimą aprūpinti gyvenamuoju būstu. O pasitelkus 3D



spausdinimo technologiją tai padaryti bus galima greičiau, kompleksiškiau ir išnaudojant mažiau resursų.

Apibendrinant 3D betono spausdinimo technologijos pasiekimus pasaulyje gali įvardinti kiekį įgyvendintų projektų pasaulio mastu. Taigi iki šios dienos pasaulyje yra įgyvendinta iš viso 66 reikšmingi projektai. Iš jų: 15 - Azijoje, 17 – Pietų ir Šiaurės Amerikoje bei 34 – Europoje. Iš šių skaičių galima teigti, kad ši technologija įgauna didelį pagreitį ir pasaulio valstybių susidomėjimas sparčiai auga.

Tačiau kol kas nėra patentuota technologija pramoninei statybai, todėl yra tikslinga atlikti tyrimus ir rasti efektyviausiai tinkančią medžiagą pritaikant ją technologijai. Ypatingai mažai skelbiama apie becemenčio betono panaudojimą 3D spausdinimo technologijoje. Todėl yra svarbu atlikti tikslingus tyrimus ir atrasti optimaliausią tokio betono sudėtį.

### **1.1.2. Geopolimerinio betono panaudojimas statybose**

Tradiciniu statybos būdu geopolimerinis betonas pasaulyje jau yra panaudotas. Tai – Klimato Kaitos institutas Australijoje, pastatytas 2013 metais [15]. Šis pastatas yra pirmasis statinys iš geopolimerinio betono (5 pav.). Konstrukciniu požiūriu šis pastatas yra iš surenkamojo gelžbetonio. Statinio blokai yra pagaminami gamykloje ir statybos aikštelėje surenkami į galutinį statinį.



**5 pav.** Klimato kaitos institutas Australijoje, 2013 m. Pastatytas iš geopolimerinio betono.

Geopolimerinio betono vienos tonos kaina yra žemesnė negu portlandcementinio betono. Teigiama, kad skirtumas gali siekti 10%–30% [16]. Tačiau 3D spausdinimo technologijoje naudojamas geopolimerinis betonas turi pasižymėti papildomomis savybėmis, tokiomis kaip ypač greitu kietėjimu bei mažu slankumu. Todėl šio betono pritaikomumas spausdinime turi būti ištirtas.

## **1.2. Lietuvos moksliniai pasiekimai 3D betono spausdinimo technologijoje**

Ši sritis Lietuvoje nagrinėta vos keliose įstaigose. Vieninteliai KTU statybinių medžiagų mokslininkai pradėjo gilintis į 3D spausdintuvo, tinkančio betono spausdinimui, medžiagos bei viso proceso kūrimą [7]. Kaip teigia KTU mokslininkų komandos pagrindinis tyrėjas V. Vaitkevičius: „3D

spausdinimo technologijas statyboms pritaikyti bandoma visame pasaulyje – randame informacijos iš Olandijos, Švedijos, Kinijos, kurioje tokiu būdu yra atspausdinta keletas namų, amerikiečiai taip pat yra gerokai pasistūmėję į priekį. Tačiau kol kas, mano žiniomis, patentuotos technologijos nėra“ [8].



**6 pav.** 3D spausdintuvas spausdina betono karkasą laboratorijoje [8].

Dirbant su tarpdisciplininių sričių specialistais KTU mokslininkų komandai pavyko sukurti robotą – spausdintuvą, kuris pilnai galėtų atlikti spausdinimo užduotį, tačiau mažu pajėgumu ir nedideliais kiekiais. Tai kartu pareikalavo programinės įrangos sukūrimo, kurioje būtų galima iš anksto užprogramuoti norimo rezultato maketą. Sukurta „Cura“ programinė įranga. Tai atviro tipo programinė įranga naudojama valdyti prietaisus, mechaninius elementus. Taip pat vienas iš svarbiausių ir sudėtingiausių žingsnių buvo sukurti tinkamą medžiagą spausdinimui. Sukurtas 3D spausdintuvo mišinys, kurį daugiausia sudaro vanduo, aliuminio cementas, smėlis ir greitiklis (pagreitinantis betono džiūvimą). Turint šį mišinį ir keičiant greitiklio santykį, džiūvimo procesą galima pagreitinanti iki 5 min, arba palėtinti iki 30 min.

Kol kas buvo atlikti tyrimai ir bandymai su betonu, kuriame naudojamas aliuminio cementas. Jokių bandymų nebuvo atlikta naudojant becementį betoną. Todėl atradus tinkamą becemenčio betono sudėtį ir pritaikius jį 3D spausdintuvui, tai būtų didelis mokslinis pasiekimas.

### **1.3. Polimeriniai rišikliai**

Polimerais vadinamos stambia molekulinės medžiagos, kurių molekulėse tolygiai arba netolygiai pasikartoja struktūrinės grandys, kurios yra susietos kovalentinėmis jungtimis. Statybose dažniausiai pasitaikantys sintetiniai polimerai. Jie yra gaunami sintezės būdu iš smulkiamolekulinių medžiagų – monomerų [17].

### **1.4. Geopolimerinės medžiagos**

Norint statybose naudoti ekologiškesnes medžiagas neprarandant fizikinių bei mechaninių savybių reikia ieškoti pakaitalo jau esamoms medžiagoms. Vienas iš tinkamų variantų pakeisti nusistovėjusį betoną su portlandcemenčiu galėtų būti geopolimerinis betonas. Jis iš esmės išsiskiria tuo, kad jo





## 1.5. 3D spausdinimui naudojamas becementis betonas

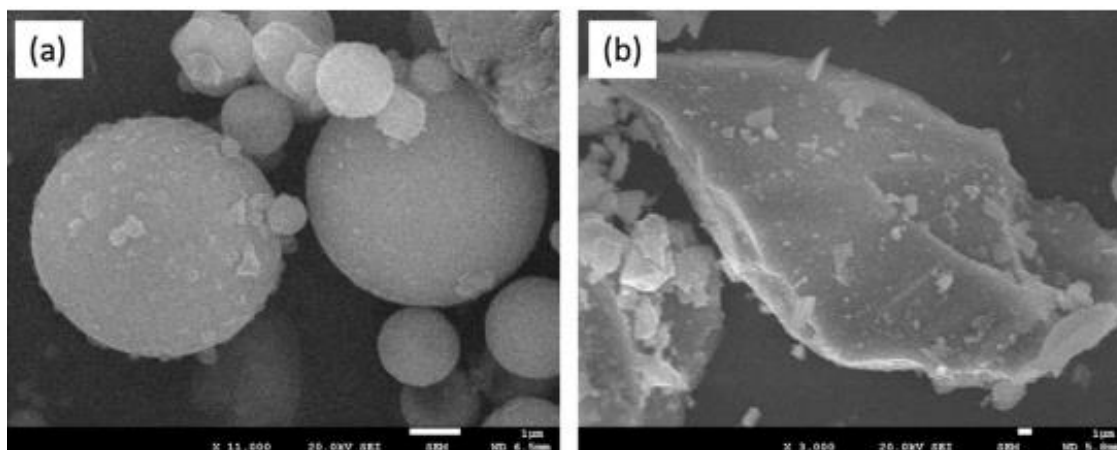
Atsižvelgiant į geopolimerinio betono panaudojimą 3D spausdinimo technologijoje turi būti įvertintas papildomas faktorius. Tai yra sluoksnių tarpusavio susirišimas. Suprojektavus per ilgus tarpus tarp sluoksnių išliejimo gali būti prarandamas medžiagos dalelių sukibimas ir tai gali sukelti ankstyvą griūtį. O tai priklauso ne vien nuo laiko tarpo, bet ir nuo medžiagos rišimosi pradžios ir sluoksnių išliejimo laiko tarpų suderinimo.

„Nanyang“ techniška jame universitete, Singapūre atliktas tyrimas becemenčio betono panaudojimui 3D spausdinimo technologijoje [23]. Tyrimo metu atlikti fizikinių bei mechaninių savybių nustatymo bandymai. Šiam tikslui buvo naudojama viena becemenčio betono sudėtis (8 pav):

Medžiagos	Lakieji pelenai	Šlakas(GGBS)	Silicio pudra	Smėlis	Kalio silikatas	Vanduo	Priedai
Sudėtis (kg/m <sup>3</sup> )	572.34	35.52	101.86	1219.74	140.739	144.09	10.05

8 pav. Medžiagos sudėtis 3D becemenčio betono spausdinimui

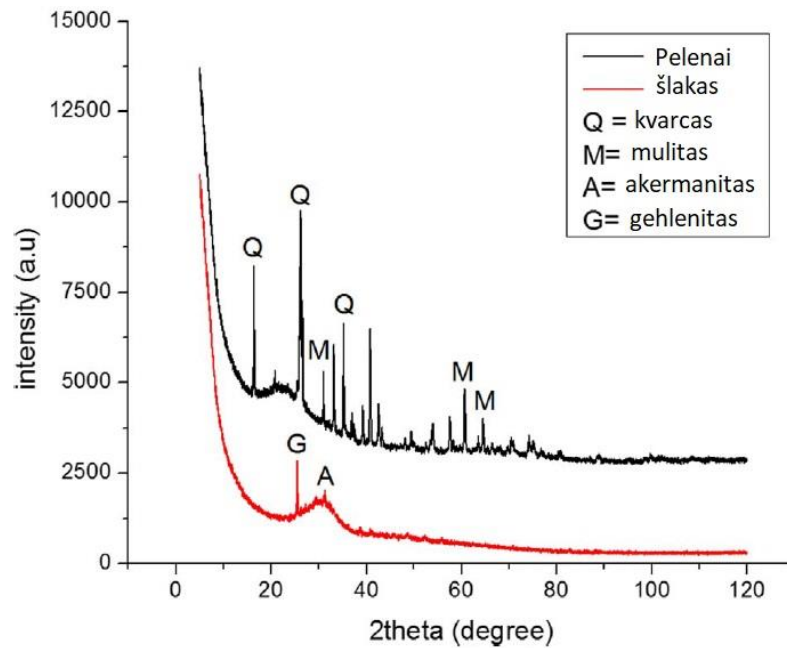
Pagrindinė becemenčio betono sudedamoji dalis – lakieji pelenai – buvo gauti iš Kinijos ir priskirti F klasei pagal ASTM C618-12a standartą. Detalus cheminių junginių kiekis sudarantis lakiuosius pelenus yra 49.10% SiO<sub>2</sub>, 39.35% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3.48% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2.94% CaO, 0.328% Na<sub>2</sub>O ir 1.4% nenustatyti junginiai. Šlakas (angl. *Ground granulated blast-furnace slag (GGBS)*) ir malta silicio pudra buvo gauta iš įmonės „Engro and Elkem Pvt. Ltd.“ [23]. Ypatingai svarbu žinoti žaliavų kilmę ir jas sudarančius cheminius elementus. Nuo to priklauso galutiniai gauto becemenčio betono parametrai. Skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu (SEM) buvo ištirti lakieji pelenai (9 pav. (a)) bei šlakas (9 pav. (b)).



9 pav. Elektroniniu skenuojančiuoju mikroskopo rezultatai. a - lakieji pelenai. b - šlakas.

Iš gauto rezultato matoma, kad šlako (9 pav. (b)) dalelės gautos netaisyklingos formos, o lakiųjų pelenų (9 pav. (a)) dalelės gautos beveik idealiai sferinės formos.

Taip pat atlikta rentgeno grafinė analizė nustatyti lakiųjų pelenų bei šlako kristalinių gardelių savybes bei aktyvumą. Bandymas buvo atliktas 2theta kampu tarp 10 ir 120 laipsnių naudojantis cinko ir kalio (CuK $\alpha$ ) elementų šaltiniu kambario temperatūroje (10 pav.).



10 pav. Rentgenografinė analizė

Iš gautos difraktogramos aiškiai matoma, kad šlakas yra daugiausiai amorfinė medžiaga, o lakieji pelenai pasižymi amorfinėmis savybėmis tik 10 ir 30 laipsnių diapazone. Šis amorfinis žaliavų pobūdis paspartina polimerizacijos procesą, nes jį lengva ištirpinti šarminiame tirpale, pavyzdžiui, natrio arba kalio silikatuose.

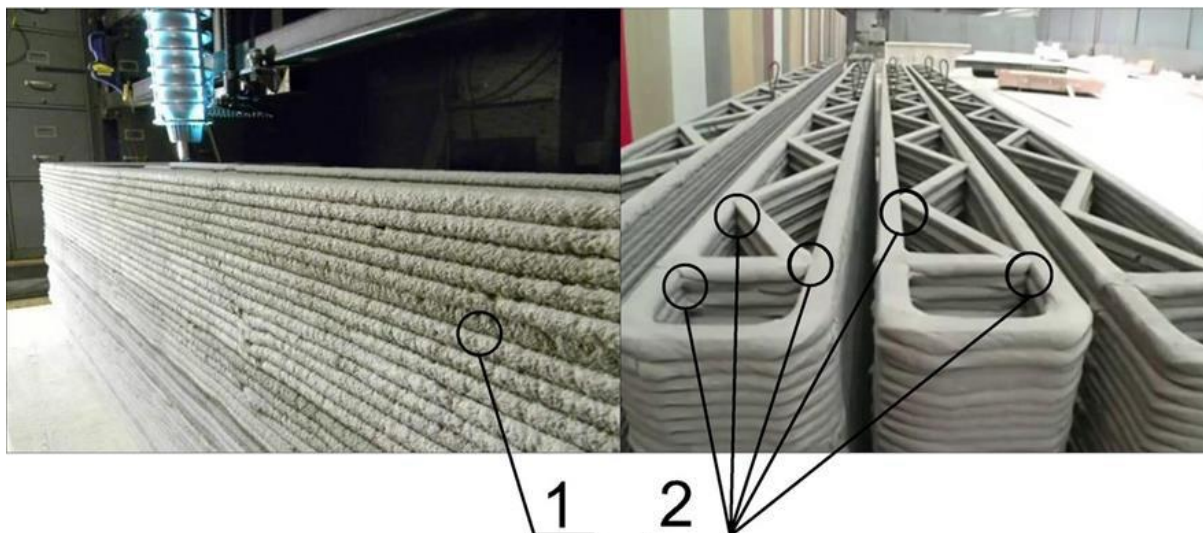
Tyrimo metu atliktų mechaninių stiprumo bandymų rezultatai gauti po 28d. kietėjimo. Stiprumas lenkiant – 5,05 MPa, tempiamasis stipris – 1,63 MPa, gniuždomasis stipris 36 MPa.

Taip pat labai svarbu nustatyti reologines medžiagos savybes. Jos nusako medžiagos tinkamumą ekstrudavimo procesui bei becemenčio mišinio tinkamumą statyboms – pakankamą pradinį stiprį. Kinų mokslininkų komandos atliktu tyrimu buvo nustatyta, kad didėjantis tempiamasis stipris užtikrina konstrukcijos stabilumą. Kitaip tariant medžiagoje atsiranda tarpsluoksninio sukibimo jėga didėjant apkrovai [24].

### 1.6. Laiko tarpo tarp dviejų betono sluoksnių paklojimo įtaka betono tempiamajam stipriui

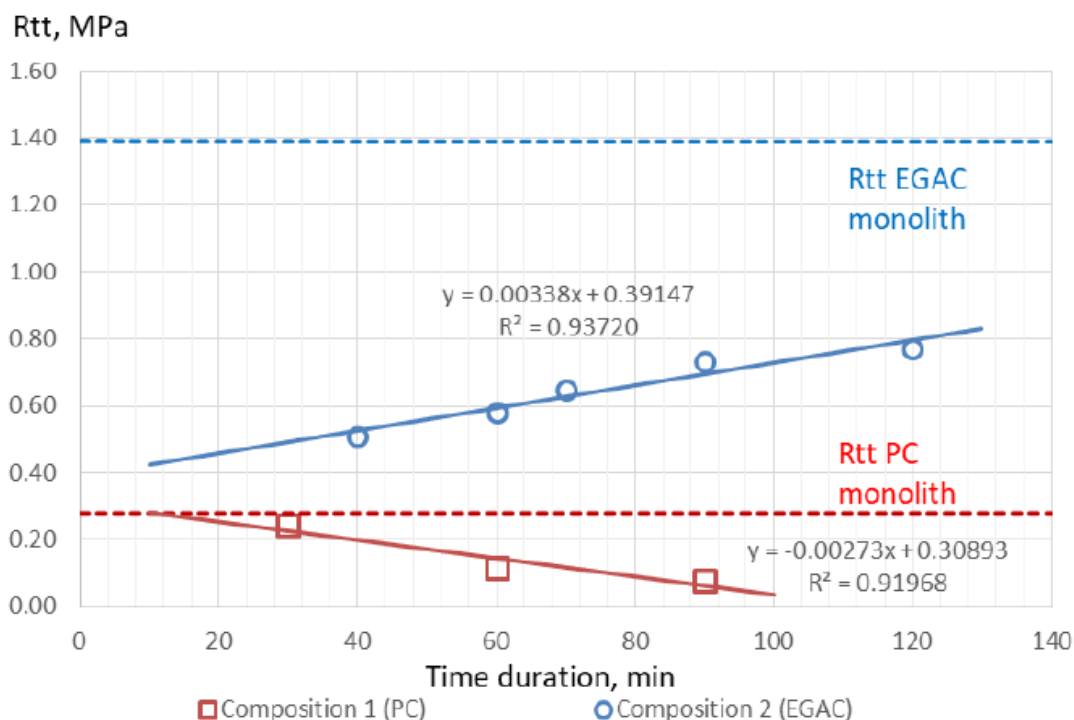
Kaip ir visos statinių konstrukcijos turi pasižymėti stabilumu ir pastovumu vyraujant įvairiems poveikiams – taip ir atspausdinti betono sluoksniai po sukietėjimo turi būti vienalyčiai ir pilnai sukibę tarpusavyje. Tačiau neretai pasitaikantis atvejis, kai susidaro nesukibusio betono ruožai horizontaliuose sluoksniuose (11 pav. (1)) arba vertikaliose jungtyse (11 pav. (2)). To pasekoje sumažėja konstrukcijos standumas ir sumažėja laikomoji galia.

Norint sužinoti laiko tarpo įtaką tarp dviejų skirtingų betono sluoksnių paklojimo siūlės horizontaliam stiprumui, buvo pagaminti dviejų stadijų bandiniai. Bandymui atlikti kubelio forma iki pusės buvo užpildyta statybine medžiaga, o po pertraukos kuri tęsėsi nuo 30 iki 120 minučių, antrasis betono sluoksnis buvo supiltas į formą. Vibracinis tankinimas nebuvo taikomas. Sukibimo stiprumas buvo išbandytas atliekant skėlimo bandymą bandiniams po 7 dienų kietėjimo [35].



**11 pav.** Galimos nesukibusio betono atsiradimo vietos

Vienas iš perspektyvių būdų sumažinti trapumo riziką betono kietėjimo metu yra panaudoti susitraukimus reguliuojančius rišiklius, tokius kaip besiplečiančio gipso – aliuminio cementas (angl. *expanding gypsum – alumina cement*). Taikomas besiplečiančio gipso – aliuminio cementas (toliau – EGAC) yra sudarytas iš aukšto aliuminio oksido cemento, porlandcemenčio bei malto gipso akmens (kalcio sulfato dehidratas). Pasirinktos EGAC sudėties mineralinių komponentų santykis užtikrina nedidelį smulkiagrūdžio betono išsiplėtimą per pirmąsias 3 – 5 dienas orausėmis kietėjimo sąlygomis (1-2 mm/m), o po to nedidelį 0,8 mm/m ar mažesnę susitraukimą nuo pradinio dydžio iki 28-osios kietėjimo dienos.



**12 pav.** Laiko tarp tarp dviejų betono sluoksnių paklojimo įtaka sukibimui (skeliamoji galia  $R_{tt}$ )

Skėlimo bandymo rezultatai dviejų tipų betonams – vieno įprastinio portlancemenčio (PC) ir kito, modifikuoto besiplečiančio gipso – aliuminio cemento pateikiami diagramoje (12 pav.).

Brūkšninė linija diagramoje simbolizuoja vientiso bandinio – monolitinio stiprumą. Kiti rezultatai yra priklausomi nuo laiko tarpo tarp antro betono sluoksnio paklojimo. Analizuojant raudonos spalvos kreivę, atstojančią betoną su portlancemenčio rišikliu, galima pastebėti aišką ir beveik linijinę tempiamojo stiprio mažėjimo kreivę didėjant laiko tarpui. Pavyzdžiui, po 30 minučių pertraukos  $R_{tt}$  sumažėjo nežymiai, tačiau po 60 min pertraukos sukibimo jėga tarp sluoksnių sumažėjo daugiau negu dvigubai.

Smulkiagrūdžio betono su besiplečiančio gipso – aliuminio cemento rišikliu rezultatai unikalūs. Po 40 min pertraukos tarp antro betono sluoksnio užliejimo, sukibimo jėga nukrito ženkliai. Ji siekė vos 35% lyginant su monolitiniu bandiniu. Šiuo atveju, taip pat kaip ir su portlandcementiniu betonu, laiko tarpo didėjimas padarė įtaką tempiamajam betono stipriui  $R_{tt}$ . Tačiau esminis skirtumas yra tas, kad tempiamasis stipris EGAC betono didėjo, didėjant laiko tarpui tarp antro betono sluoksnio užliejimo. Esant 2 valandų pertraukai tempiamasis stipris nukrenta iki 50% lyginant su monolitiniu bandiniu.

Fenomenalus reiškinys dėl staigaus tempiamojo stiprio mažėjimo ir nežymaus jo didėjimo ilginant pertrauką iki antrojo sluoksnio paklojimo yra siejamas su naudojamos sudėties vidinių išsiplėtimo deformacijų ypatumais. Akivaizdu, kad išsiplėtimo deformacijos ypač aktyvios per pirmąją valandą po sumaišymo su vandeniu. Todėl antrojo sluoksnio užliejimas aktyviosios pirmojo sluoksnio išsiplėtimo deformacijos metu lemia prastą sluoksnių tarpusavio sankabumą. Po ilgos pertraukos aktyvių vidinių deformacijų fazė beveik baigta, todėl užliejus antrą betono sluoksnį sukibimo jėga yra didesnė.

### **1.7. Literatūros analizės rezultatai**

Atlikus literatūros analizę galima teigti, kad becemenčio betono naudojimas statybose šiuo metu yra mažai taikomas ir mažai ištirtas, dėl to, kad naudojamas portlancementis. 3D spausdinimo technologijai pritaikytos becemenčio betono medžiagos kol kas nėra patentuota. Yra atlikta keli bandymai, bet konkrečių palyginimų bei realių rezultatų kol kas nėra. Todėl becemenčio betono panaudojimą 3D spausdinimo technologijoje ir jo struktūros bei savybių tyrimą atlikti reikia norint rasti optimaliausią sudėtį ir ištirti tokio betono parametrus.

## 2. Eksperimentinė dalis

### 2.1. Tyrimo objektas, tikslas ir uždaviniai

Baigiamojo darbo tyrimo objektas yra becementis betonas, tinkamas naudoti 3D spausdinimui statybose. Magistriniame darbe bus tiriama šių priedų įtaka rišimosi procesui: stiklo, kalkių bei lakiųjų pelenų.

Darbo tikslas – ištirti bei rasti optimaliausią becementinio betono sudėtį tinkamą 3D betono spausdinimui.

Magistro baigiamojo projekto uždaviniai:

- Becementinio rišiklio eksperimentas;
- Fizikinių bei mechaninių savybių nustatymams becementiniam rišikliui;
- Ištirti laiko tarpo tarp dviejų betono sluoksnių paklojimo įtaką betono stiprumui;
- Baigtinių elementų programa atlikti 3D robotu atspausdintų sienų skerspjūvio konstrukcinę analizę ir palyginti trijų skirtingų skerspjūvių deformacijas.

### 2.2. Tyrimams naudotos medžiagos ir jų savybės

#### 2.2.1. Lokieji pelenai

Lokieji pelenai yra aktyvus pucolaninis priedas. Tai lengvi, smulkūs milteliai, gauti malant degimo pelenus iš krosnių, kūrenamų susmulkintomis anglimis (Rosenberg 2010). Lakiųjų pelenų pagrindiniai cheminiai komponentai yra  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o kartais ir  $\text{CaO}$ . Lakiuosius pelenus sudaro dalelės, kurių dydis yra nuo 5 iki 300  $\mu\text{m}$ , savitasis paviršiaus plotas nuo 300 iki 500  $\text{m}^2/\text{kg}$ , piltinis tankis 540–860  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Bandyje buvo naudojami dviejų rūšių pelenai. Pirmieji buvo Estiški skalūniniai pelenai. Skalūnų pelenai yra mineralinė medžiaga, gaminama deginant skalūną. Estijos naftos skalėje organinių medžiagų kiekis yra gana mažas, vidutiniškai 33%. Krosnis išlaiko 45% sausos masės - mineralinė dalis.

Skalūnų pelenai kaupiami pelenų laukuose, daugiausia Rytų Viru apskrityje netoli Baltijos ir Estijos šiluminių elektrinių. 2010 m. Estijoje gaminama apie 5–7 mln. Tonų skalūnų pelenų [25].

Kitas tyrime naudotas pelenų tipas – Lenkiški pelenai. Jie pasižymėjo dideliu aktyvumu pucolaninėje reakcijoje. Būtent dėl to, kad savo sudėtyje turi didelį  $\text{SiO}_2$  (silicio dioksido) kiekį.

#### 2.2.2. Skystas stiklas

Natrio silikatas ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) yra viena iš silicio rūgšties druskų, žinomų kaip vandens stiklas. Natrio silikatas yra smulkūs balti milteliai, neturintys skonio ar kvapo. Geba gerai ištirpti vandenyje. Pasirodo, labai skysto pavidalo natrio silikato paviršius atrodo kaip stiklas. Štai kodėl antrasis natrio silikato pavadinimas yra skystas stiklas. Jei pašalinsite vandenį iš šio tirpalo, gausite mažus amorfinius kristalus, panašius į stiklo gabalus, poliruotus jūros bangomis paplūdimyje. Iš išorės jie yra labai gražūs. Kristalai turi rombinę sistemą su keturiais atomais ląstelėje. Kai natrio silikato tirpalas pašildomas iki 300  $^{\circ}\text{C}$ , jis pradeda virti ir žymiai padidinti tūrį. Veikiant orui, natūralus natrio silikatas palaipsniui suyra. Tai sudaro molį ir smėlį. Skystas stiklas gali reaguoti su stipriomis rūgštimis. Rezultatas yra stabili silicio rūgštis.

### 2.2.3. Kalkės

Kalkės – daug kalčio turintys milteliai. Bandyje buvo naudojama gesintų kalkių tešla  $\text{Ca(OH)}_2$ . Tai yra rezultatas sumaišius kalčio oksido miltelius su vandeniu (2.2.1 formulė):



Bandyje naudotas gesintų kalkių ir vandens mišinys. Priimama, kad kalkių koncentracija vandens ir kalkių mišinyje buvo iki 50%.

### 2.2.4. Maltas stiklas

Malto stiklo milteliai – tai iš stiklo atliekų malimo būdu gautas pucolaninis priedas, pagrindinis cheminis komponentas  $\text{SiO}_2$ , jo savitasis paviršius apie  $300 \text{ m}^2/\text{kg}$  ir daugiau, dalelių dydis kinta nuo 10 iki  $300 \mu\text{m}$ . Mokslininkai Mi-razahosseini ir Riding nustatė, kad kietėjimo temperatūra yra vienas svarbiausių veiksnių, turinčių įtakos šio pucolaninio priedo veikimui. Vykstant hidratacijos reakcijai  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , cemento akmens stipris padidėja iki 30 %, tačiau esant mažesnei temperatūrai pucolaninė reakcija nevyksta ir stipris sumažėja. [25]

Bandyams buvo naudojamas įvairių butelių maltas stiklas. Stiklas buvo malamas iki tol, kol nebeliko jokių stambių dalelių. Frakcijos patikrinimui stiklas buvo prasijojamas pro 0,1 mm stambumo sietą. Malto stiklo pagrindinės savybės: frakcija – 0/01; lyginamasis paviršius –  $1485 \text{ cm}^2/\text{g}$ ; piltinis tankis –  $1245 \text{ kg/m}^3$ ; tankis –  $2266 \text{ kg/m}^3$ . Užpildo savybės tenkina LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus.

### 2.2.5. Maltas kvarcinis smėlis

Malto kvarcinio smėlio pagrindinės funkcijos: pagerinti mišinio granulimetrinę sudėtį ir padidinti santykinį mišinio tankį. Nustatyta, jog maltas kvarcinis smėlis, net ir praėjus labai ilgam laikui  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  temperatūroje, yra inertinė medžiaga, tačiau kietinant autoklavinėmis sąlygomis pasižymi pucolaninėmis savybėmis.

Betono užpildui buvo naudojama kvarcinis smėlis, gautas iš „Zatyšių karjero“. Smėlio frakcija 0,4 mm. Tam, kad gauti reikiamą smulkumą, užpildas dar buvo papildomai malamas laboratorijoje vibromalūnu 10 minučių. Naudojamo malto kvarcinio smėlio smulkumas yra apie  $1,5 \text{ m}^2/\text{g}$ .

### 2.2.6. Cementas

Atlikti palyginimui buvo maišomas įprastinis betonas ir jam naudota pagrindinė rišamoji medžiaga yra cementas. Tai hidraulinė rišamoji medžiaga (pradėjusi kietėti ore gali toliau kietėti ir vandenyje).

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 UAB „Akmenės cementas“ portlandcementis - EN 197-1-CEM I 42,5 R, 42,5 stiprumo klasės didelio ankstyvojo stiprumo portlandcementis. Cemento stipris gniuždant po 2 parų  $28 \pm 2 \text{ MPa}$ , po 28 parų  $54 \pm 3 \text{ MPa}$ . Rišimosi pradžios laikas – 150 minučių, tūrio pastovumas 1,0

mm, vandens sąnaudos 25,2 %, liekana ant 90 µm sieto 1,3 %, savitasis paviršius 3700 cm<sup>2</sup>/g, hidratacijos šiluma – 373 J/g. [27].

### **2.2.7. Gipsas**

Atliekant bandymus su cementiniu rišikli papildoma rišamoji medžiaga reguliuojantį rišimosi pradžios laiką yra kalcio sulfatas (gipsas). Tai orinė rišamoji medžiaga, kurią sudaro pusvandenis kalcio sulfatas. Apdirbimo metu iškastinė gipso gamtinė uoliena yra kaitinama, proceso metu dvivandenis gipsas dehidratuoja, po vandens išgaravimo gaunami smulkūs pusvandenio gipso kristalai [17].

Bandymų metu naudotas gipsas – statybinis gipsas EN 13279-1-A2-10-6. Medžiagos pagrindas – kalcio sulfato pushidratis. Sukietėja per 30 min (esant + 23 °C temperatūrai ir 50 % santykinėi oro drėgmei. Vandens jonų rodiklis (pH) ~ 7 (vandens suspensija), skilimo temperatūra > 1000 °C (skylia į CaO ir SO<sub>3</sub>), tirpumas vandenyje ~ 8,8 g/l (20 °C), tankis 2,6-2,7 g/cm<sup>3</sup> [26].

### **2.2.8. Vanduo**

Bandymui buvo naudojamas vanduo iš miesto vandentiekio sistemos. Yra žinoma, kad šis vanduo nėra užterštas chloridais, nitratais rūdinėmis priemaišomis ar kitais nepageidaujamais cheminiais elementais, kurie galėtų padaryti neigiamą įtaką betonui. Vandens pH > 4, organinių priemaišų nedaugiau kaip 20 mg/l, bei ištirpusių druskų ne daugiau kaip 2%. Naudotas vanduo yra priskiriamas geriamojo vandens tipui. Taip pat tenkina LST EN 1008:2005 „Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant gražinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti“ standarto reikalavimus.

## **2.3. Tyrimų metodai**

### **2.3.1. 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. [28];
- LST EN 12390-7:2009 „Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis“ pagal šį standartą buvo apskaičiuojamas betono tankis. [29];
- 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. [30];
- LST EN 12390-3:2009 „Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris“ Standartas, kurio vadovaujantis buvo nustatomas gniuždymo stipris. [31];
- 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. [32];
- LST 1428-19:2016 „Betonas. Bandymo metodai. 19 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas vienušiu užšaldymu ir atšildymu“ standartas pagal kurį nustatoma svarbi betono savybė – ilgaamžiškumas, apskaičiuojami gaminio atsparumo šalčiui ciklai. [33].

### 2.3.2. Mišinių maišymas

Bandymo metu visos medžiagos buvo dozuojamos pagal masę. Teisingai atsverus medžiagas pagal reikiamą sudėtį jos supilamos į sausą dubenį. Vanduo bei kiti skysti komponentai nepilami. Maišymui naudojama betono maišyklė „Automix“ (13 pav.). Pirmiausiai sumaišoma sausa mišinio dalis kol gaunamas homogeninis mišinys. Vėliau supilama pusė reikiamo vandens (kartu su skystu stiklu arba kalkių ir vandens tešla). Mišinys pamaišomas 30 sekundžių. Po to pilamas likęs vandens arba papildomų komponentų mišinio kiekis. Maišoma iki vientisos masės. Galiausiai mišinys supilamas į iš anksto paruoštas bei suteptas prizmės 40 \* 40 \* 160 mm formas.



13 pav. Betono maišyklė „Automix“

### 2.3.3. Fizikinių savybių nustatymas

Bandinio tankis nustatomas medžiagos masės ir tūrio santykiu. Detalus betono tankio nustatymo metodas pateikiamas LST EN 12390-7:2009 standarte. Tyrimui naudojamos svarstyklės (14 pav.) (paklaida 0,5 g) masei nustatyti, slankmatis – bandinio trijų kraštinių matmenims nustatyti (tūrio skaičiavimui). Šios svarstyklės (14 pav.) buvo taip pat naudojamos medžiagų kiekiams sverti.



14 pav. Svarstyklės „KERN PCB“



### 2.3.4. Mechaninių savybių nustatymas

LST EN 12390-3:2009 standarte nurodomas betono bandinių stiprio gniuždant metodas [31]. Bandiniai gniuždomi iki suirimo. Užrašoma didžiausia bandinio atlaikoma apkrova ir apskaičiuojamas betono stipris gniuždant.

Gniuždymo bandymo mašina atitinka EN 12390 – 4 standartą.

Bandinys turi būti kubas, cilindras arba kernas, atitinkantis EN 12350 – 1, EN 12390 -1 , EN 12390-2 arba EN 12504-1 reikalavimus.

Iki bandinio padėjimo į bandymo mašiną (15 pav.) nuo jo paviršiaus nušluostoma perteklinė drėgmė. Švariai nušluostomi visi mašinos atraminiai paviršiai ir nuo bandinio paviršiaus pašalinami laisvi grūdėliai arba pašalinės medžiagos, kad būtų sąlytis su mašinos plokštelėmis.

Tarp bandymo mašinos plokščių ir bandinio nededami jokie intarpai, išskyrus pagalbines plokšteles arba tarpo reguliavimo blokus (žr. EN 12390 – 4). Bandiniai padedami taip, kad apkrova veiktų statmenai formavimo kryptčiai. Bandinio centras turi sutapti su apatinės plokštelės centru +/- 1 % nurodyto bandinio kraštinės arba nurodyto cilindro skersmens dydžio tikslumu. Jeigu naudojamos pagalbinės plokštelės, jos turi būti prigludžiamos prie bandinio viršutinio ir apatinio paviršių (tačiau ne ant glaistyto paviršiaus).

Parenkamas pastovus apkrovos didinimo greitis. Apkrova bandiniui perduodama be smūgių ir nepertraukiamai didinama pastoviu  $\pm 10$  % greičiu tol, kol toliau nedidėja. Stipris gniuždant apskaičiuojamas pagal formulę:  $f = F/A$ .

F- didžiausia ardomoji apkrova [N]; A – bandinio skerspjūvio plotas [mm<sup>2</sup>], kurį veikė gniuždymo jėga, kuri apskaičiuota iš bandinio dydžio (žr. EN 12390-1) arba bandinio matmenų matavimo. [31]



15 pav. Hidraulinis presas „Toni Technik 2020“ gniuždomajam stipriui nustatyti

### 2.3.5. Lenkiamojo stiprio nustatymas

LST EN 12390-5:2009/P:2011 standarte nurodomas betono bandinių lenkiamojo stiprio nustatymo metodas. [30]

Prizminės formos bandiniai pastatomi vienodais atstumais ant dviejų ritinėlių. Vertikali jėga perduodama per viršutinį ritinėlį, kuris yra išcentruotas. Bandinys suyra dėl atsiradusio lenkimo momento, kuris atsiranda dėl jėgų poros. Fiksuoja maksimali apkrova bei apskaičiuojamas lenkiamasis stipris. Bandymas atliekamas bandymo mašina, kuri atitinka EN 12390-4 standartą.

Apkrovos perdavimo įtaisas susideda iš dviejų atraminių ritinių ir dviejų viršutinių ritinių, kurie padedami skersai bandinio ir tolygiai paskirsto mašinos perduodamą apkrovą tarp šių dviejų ritinių. Ritiniai turi būti plieniniai, skritulinio skersmens nuo 20 iki 40 mm. Jų ilgis turi būti mažiausiai 10 mm ilgesnis už bandinio plotį. Trys ritiniai, įskaitant ir du viršutinius ritinius, turi laisvai sukis apie savo ašį ir gali būti pakreipti statmenai bandinio išilginei ašiai (16 pav.).



16 pav. Hidraulinis presas „Toni Technik 2020“ lenkimo bandymams atlikti

Bandiniai turi būti prizmės pagal EN 12390-1. Suformuoti formose bandiniai turi atitikti EN 12350-1 ir EN 12390-2. Siekiant užtikrinti gerą sąlytį su ritiniais, švariai nuvalomi visi mašinos atraminiai paviršiai, o nuo bandinių paviršiaus pašalinami bet kokie apibirę užpildai ar kitos pašalinės medžiagos. Bandinys tiksliai centriškai padedamas į mašiną ir centruojamas stačiais kampais pagal bandinio išilginę ašį bei viršutinių ir apatinių ritinių išilgines ašis.

Apkraunant bandinį parenkamas pastovus jėgos didinimo greitis. Apkrova tolygiai be smūgių didinama parinktu pastoviu greičiu  $\pm 1\%$  tikslumu, kol toliau nedidėja [38].

Stipris lenkiant apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_c = \frac{3}{2} \cdot \frac{f \cdot l}{d_1 \cdot h} \quad (2.3.1)$$

Naudoti žymenys:  $f_c$  – stipris lenkiant [MPa];  $f$  – ardomoji jėga [N];  $l$  – atstumas tarp apatinių ritinių [mm];  $d_1$  ir  $h$  – skerspjūvio šoniniai matmenys [mm].

### 2.3.6. Kietinimo procedūra

Pucolaninės reakcijos vyksmui reikalinga aukštesnė nei  $50^\circ\text{C}$  temperatūra. Todėl becemenčiai betonai po supylimo į formas buvo patalpinami į kietinimo kamerą (17 pav.).



17 pav. Bandinių džiovyklė

Kameroje buvo nustatyta  $60^\circ\text{C}$  temperatūra. Bandiniai kietinimo kameroje išbuvo 48 valandas. Po šio laiko priimama, kad bandiniai įgavo ne mažesnę nei 95% galutinio stiprio ir pucolaninės reakcijos įvyko pilnai. Toliau bandiniai išformuojami ir atliekami tolimesni bandymai, siekiant ištirti fizikines bei mechanines becemenčio betono savybes.

### 2.4. Becemenčio rišiklio eksperimentas

Eksperimentinė dalis prasidėjo nuo pagrindinės ir svarbiausios užduoties – atrasti tinkamą becemenčio betono rišiklio sudėtį. Šiam tikslui buvo paruošti 9 skirtingų sudėčių bandiniai (2.1 lentelė). Iš paruošto mišinio buvo suformuojami cilindro formos bandiniai, o likęs nepanaudotas rišiklis buvo patalpinamas į plastikinius puodelius ir užpilamas vandeniu. Taip buvo išsiaiškinta ar rišiklis yra tirpus vandenyje ar ne. Taip pat vienas iš galimų nepageidaujamų scenarijų gali pasireikšti skysto stiklo išsiskyrimu į vandenį. Taip vyksta kai dėl difuzijos skystas stiklas prasiskverbia iš didesnės koncentracijos į mažesnę (vandenį).

## 2.1 lentelė Bandinių sudėtys

Komponentas	Bandinio Nr.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Medžiaga									
Maltas stiklas (kg)	0,059	-	0,041	0,047	0,035	0,029	0,047	0,035	0,018
Skystas stiklas (kg)	0,023	0,023	0,023	0,023	-	-	0,023	-	-
Smėlis (kg)	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215
Vanduo (l)	0,024	0,024	0,024	0,024	-	0,024	0,024	-	0,024
Pelenai (kg)	-	0,059	0,018	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,029
Kalkės ir vanduo (kg)	-	-	-	-	0,05	0,075	-	0,05	0,05

## 2.2 lentelė Sudėčių aprašymai

Bandinio numeris	Sudėties aprašymas
1	Bazinė sudėtis
2	Pelenai vietoje malto stiklo
3	70 % maltas stiklas, 30 % estiški pelenai
4	80 % maltas stiklas, 20 % estiški pelenai
5	60 % maltas stiklas, 20 % estiški pelenai, 20 % kalkės
6	50 % maltas stiklas, 20 % estiški pelenų, 30 % kalkės
7	80 % maltas stiklas, 20 % lenkiški pelenai
8	60 % maltas stiklas, 20 % lenkiški pelenai, 20 % kalkės
9	30 % maltas stiklas, 50 % lenkiški pelenai, 20 % kalkės

Iš karto po suformavimo bandiniai formose buvo patalpinti į kaitinimo kamerą ir ten laikomi dvi paras. Klimatinės sąlygos buvo nustatytos ties 60 °C temperatūra. Polimerizacijos reakcijai reikalinga temperatūra, aukštesnė nei 50 °C tam, kad įvyktų reakcija ir susidarytų geopolimerai. Nustatoma, kad po 2 parų kietinimo kameroje, bandinys įgavo visą savo stiprumą ir toliau yra išformuojamas iš formos ir laikomas kambario temperatūroje.

## 2.3 lentelė Rišiklio vizualinis vertinimas bei pastabos

Bandinio numeris	Pastabos
1	Tirpus (neatsparus drėgmei)
2	Natūraliai nesukietėjo
3	Netirpus (greitai rišosi)
4	Labai mažai tirpus
5	Natūraliai nesukietėjo (tik 60 °C kaitinimo kameroje)
6	Natūraliai nesukietėjo (tik 60 °C kaitinimo kameroje)
7	Sukietėjo natūraliai. Netirpus
8	Natūraliai nesukietėjo (tik 60 °C kaitinimo kameroje)
9	Natūraliai nesukietėjo (tik 60 °C kaitinimo kameroje)



**18 pav.** Bandiniai: 1-as, 2-as ir 3-ias

Kaip matome pateiktame paveikslėlyje (18 pav.) pirmasis bandinys yra homogeniškas, vizualiai atrodo vientisas bei neaptrupėjęs. Tačiau atkreipus dėmesį į plastikiniame puodelyje esantį vandenį galime pastebėti neskaidrias nuosėdas. Tai yra išsiskyręs skystas stiklas. Tikėtina, kad nepilnai sureagavęs silicio dioksidas  $\text{SiO}_2$  difuzijos būdu prasiskverbė iš didesnės koncentracijos į mažesnę. Toks reiškinys yra nepageidaujamas statybinių konstrukcijų medžiagoms.

Antrasis bandinys jau išformavus pradėjo trupėti rankose, todėl nebebuvo prasmės bandymų atlikti ant gniuždymo preso. Žinant, kad antrojo bandinio pagrindinis ingredientas buvo pelenai, galima teigti, kad pelenų buvo per didelis kiekis ir jiems sureagavus pradėjo trūkti vandens. Tai galime pastebėti vertinant plastikiniame indelyje esantį turinį. Matoma, kad jame nebeliko vandens.

Ieškant geresnio varianto buvo sugalvota kombinuoti pelenus bei maltą stiklą. Taigi, vietoje dalies malto stiklo panaudoti 30 % estiški skalūniniai pelenai. Iš vizualinės išvaizdos matome, kad bandinys yra vienalytis, tačiau išformuojant kampai šiek tiek aptrupėjo. Iš to galima daryti išankstinę nuostata, kad ši sudėtis nebus galutinė ir bandymus reiks daryti toliau. Taip pat atkreipus dėmesį į rišiklį plastikiniame puodelyje galime pamatyti, kad ši sudėtis nėra tirpi vandenyje. Verta paminėti ir tai, kad šios sudėties rišiklis pasižymėjo ypač greitu pradiniu rišimusi. Rišiklio tešlą pilnai išmaišyti buvo ganėtinai sudėtinga.





**19 pav.** Bandiniai: 4-as, 5-as ir 6-as

Atlikus pirmuosius tris maišymus ieškant optimaliausios becemenčio betono sudėties darbas nebuvo baigtas. Toliau buvo maišomi papildomi trys mišiniai. Atsižvelgiant į tai, kad trečiasis bandinys pasižymėjo greitu rišimusi, galima daryti išvadą, kad buvo panaudota per daug pelenų. Todėl kuriant ketvirtojo mišinio sudėtį pelenų dalis sumažinta iki 20 %. Kaip matome iš paveikslėlio (19 pav.) rezultatas yra akivaizdus. Bandinys vizualiai atrodo gana tvirtas, vienalytis bei neaptrupėjęs. Tačiau iš nuosėdų plastikiniame puodelyje matomas nedidelis skysto stiklo išsiskyrimas į vandenį.

Toliau bandymams buvo naudojamos gesintos kalkės. Penkto ir šešto bandinio sudėtys yra panašios (2.2 lentelė) tik skiriasi malto stiklo ir estiškų pelenų variacijomis. Kaip matome iš nuotraukos (19 pav.) rezultatas gautas panašus. Abu bandiniai pasižymi porėtu paviršiumi bei minimaliais aptrupėjusiais kampais. Taip pat dalis rišiklio patalpinto vandenyje visiškai nesukietėjo bei sugėrė visą vandenį.



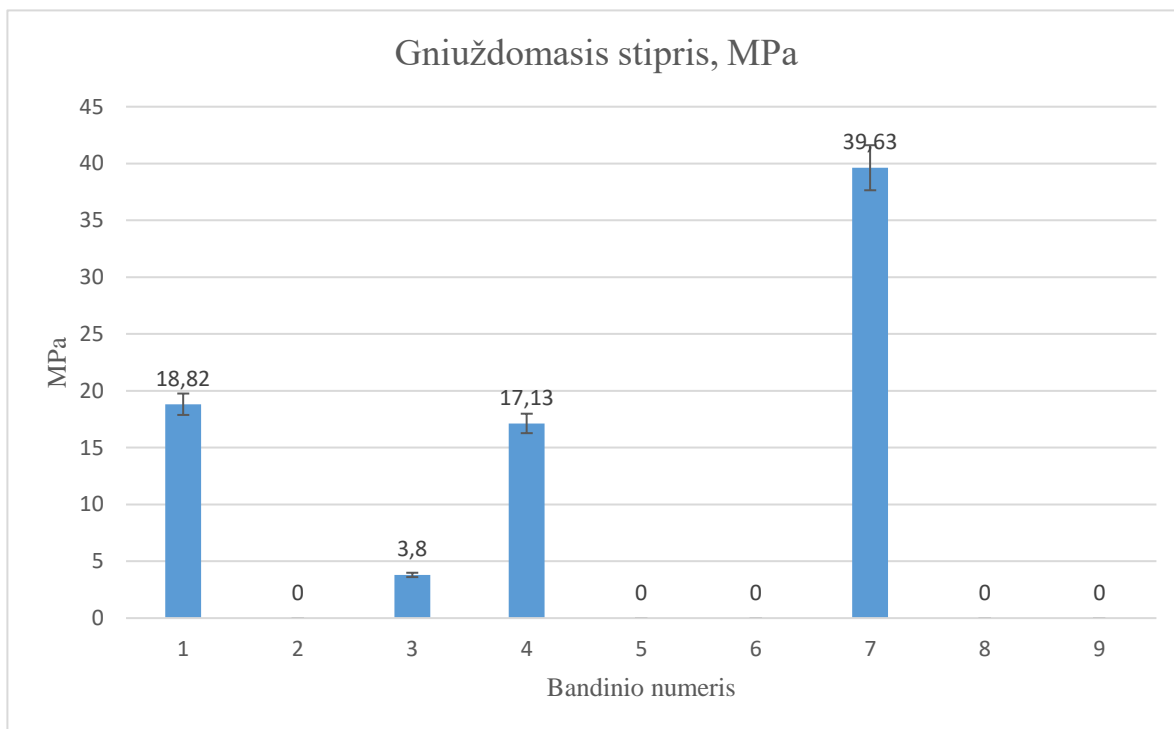
20 pav. Bandiniai: 7-as, 8-as bei 9-as

Atlikus šešis skirtingų sudėčių becemenčio rišiklio maišymus norimo rezultato gauti nepavyko. Todėl toliau buvo atliekami trys papildomi maišymai. Šios trys sudėtyys beveik identiškos prieš tai buvusiomis ketvirto, penkto ir šešto maišymo sudėtims. Tačiau esminis skirtumas yra pelenai. Šį kartą vietoje estiškų pelenų bus naudojami lenkiški pelenai. Apie juos yra žinoma tiek, kad jie pasižymi didesniu aktyvumu nei estiški pelenai. Savo sudėtyje turintys daugiau  $\text{SiO}_2$ . Todėl tikėtina, kad polimerizacijos reakcija įvyks sėkmingiau.

Kaip matome iš paveikslėlio (20 pav.) septintas bandinys iškart parodė ženklų pokytį bei geresnius rezultatus. Cilindro formos bandinys gavosi pilnai vienalytis, kampai neaptrupėjo, bei nepastebima paviršiaus poringumo. Taip pat verta paminėti, kad plastikiniame puodelyje esantis rišiklio likutis natūraliai sukietėjo. Tai labai geras ženklas tolimesniems šios sudėties bandymams.

Paskutiniai, aštuntas ir devintas, bandiniai parodė panašius rezultatus kaip ir penktas bei šeštas. Dėl naudotų kalkių visi bandiniai yra baltos spalvos bei plika akimi matomas paviršiaus poringumas. Vizualiai matoma, kad aštunto bandinio plastikiniame puodelyje patalpintas rišiklis natūraliai sukietėjo, bet jis buvo labai trapus ir greitai suskilo tiesiog paėmus į rankas. Devintojo bandinio likimas panašus, natūraliomis sąlygomis ši sudėtis sukietėti negali.

Mišiniams sukietėjus buvo atliekami mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo bandymai. Nagrinėjami atvejai ir rezultatai pateikiami žemiau (21 pav.).



**21 pav.** Rišiklio gniuždomojo stiprio rezultatai

Bandiniai, kurių gniuždomasis stipris yra 0, neatitiko vieno iš keliamų reikalavimų: bandinys nebuvo homogeniškas, t. y., trupėjo rankose arba bandiniai neatlaikė hidraulinio preso (16 pav.) „Pre-load“ funkcijos, kuri atitinka 3,8 Mpa.

Kaip matome pagal gniuždomojo stiprio rezultatus (21 pav.) geriausią rezultatą parodė septintasis bandinys, kurio sudėtis yra pateikta 2.1 lentelėje. Vizualinio vertinimo metu šis bandinys taip pat pasirodė tvirtas bei buvo tikėtina, kad parodys aukštą rezultatą. Ganėtina netikėtą rezultatą parodė ketvirtosios sudėties bandys, kurio skirtumas nuo septintojo buvo tik pelenų rūšis. Ketvirtojo bandinio gniuždomasis stipris yra 2,3 karto mažesnis nei septintojo.

#### **Pirmosios eksperimento dalies išvados:**

1. Atlikus becemenčio rišiklio tyrimą nustatyta, kad geriausia rišiklio sudėtis yra 47 g malto stiklo, 23 g skysto stiklo, 215 g smėlio, 24 ml vandens bei 12 g lenkiškų pelenų.
2. Atlikus gniuždomojo stiprio tyrimą be cementis betono rišiklis pasiekė 39,63 MPa gniuždomąjį stiprį, tačiau įvertinus fizikines medžiagos savybes reikia pripažinti, kad šiai dienai be cementis betonas nėra tinkamas naudoti 3D spausdinimo technologijoje, nes polimerizacijos reakcijai reikalinga temperatūra turi siekti bent 60 °C, o tai užtikrinti statybvietėje yra sudėtinga.

#### **2.5. Laiko tarpo tarp dviejų betono sluoksnių paklojimo įtaka betono stiprumui**

Atlikus pirmąją bandymo dalį buvo surasta tinkamiausia becemenčio betono sudėtis remiantis struktūros bei savybių rezultatais. Toliau atliekamas bandymas išsiaiškinti ar be cementis betonas yra tinkamas naudoti 3D spausdinimo technologijai. Bandymas buvo organizuotas taip, kad pavyktų imituoti spausdintuvo darbą ir sukuriama pertrauką tarp dviejų sluoksnių atspausdinimo.



Šis bandymas buvo atliekamas užpilant 2 vnt. prizmės formelių įvykdžius 15 minučių pertrauką tarp antrojo sluoksnio paklojimo (sluoksniuotas bandinys) ir 1 vnt. pilnai užpildžius formą (vientisas bandinys). Bandymui buvo naudojama cementinio betono (2.4 lentelė) bei becemenčio betono (2.5 lentelė) mišiniai.

#### 2.4 lentelė Cementinio betono sudėtis

Medžiaga	Kiekis
Cementas (kg)	0,6
Gipsas (kg)	0,066
Maltas smėlis (kg)	1,333
Vanduo (l)	0,4

#### 2.5 lentelė Becemenčio betono sudėtis

Medžiaga	Kiekis
Maltas stiklas (kg)	0,48
Lenkiški pelenai (kg)	0,12
Skystas stiklas (kg)	0,18
Vanduo (l)	0,18
Maltas smėlis (kg)	1,333

Bandinius su cementiniu betono rišikliu galima kietinti natūraliai kambario temperatūroje. Bandiniams iš becemenčio betono būtinas kietinimas esant specialioms klimatinėmis sąlygomis. Jas užtikrinti galima bandinius patalpinus į vonelę su vandeniu bei įdėjus į kaitinimo krosnelę (17 pav.). Tik užtikrinus ne mažesnę kaip 50 °C temperatūrą pradeda vykti polimerizacijos reakcija.

Bandiniams sukietėjus, jų eiliškumas buvo suskirstytas pagal lentelę 2.6:

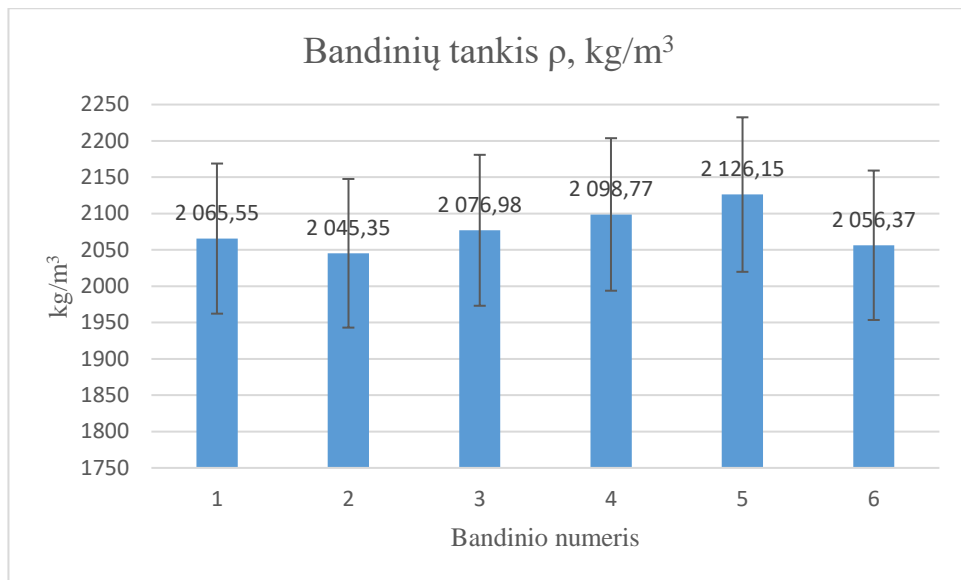
#### 2.6 lentelė Bandinių suskirstymas

Bandinio Nr.	Paiškinimas
1	Becementis sluoksniuotas
2	Becementis sluoksniuotas
3	Becementis vientisas
4	Cementinis sluoksniuotas
5	Cementinis sluoksniuotas
6	Cementinis vientisas

Sluoksniuoti bandiniai buvo formuojami naudojant rankinį ekstruderį. Taip buvo daroma dėl to, kad suformuoti vienalytę masę be tankinimo ir kaip galima tiksliau atkartoti spausdintuvo atliekamą darbą. Išliejus pirmąjį sluoksnį, buvo maišoma antroji dalis mišinio. Laiko tarpas tarp antro sluoksnio išliejimo yra lygiai 15 minučių.

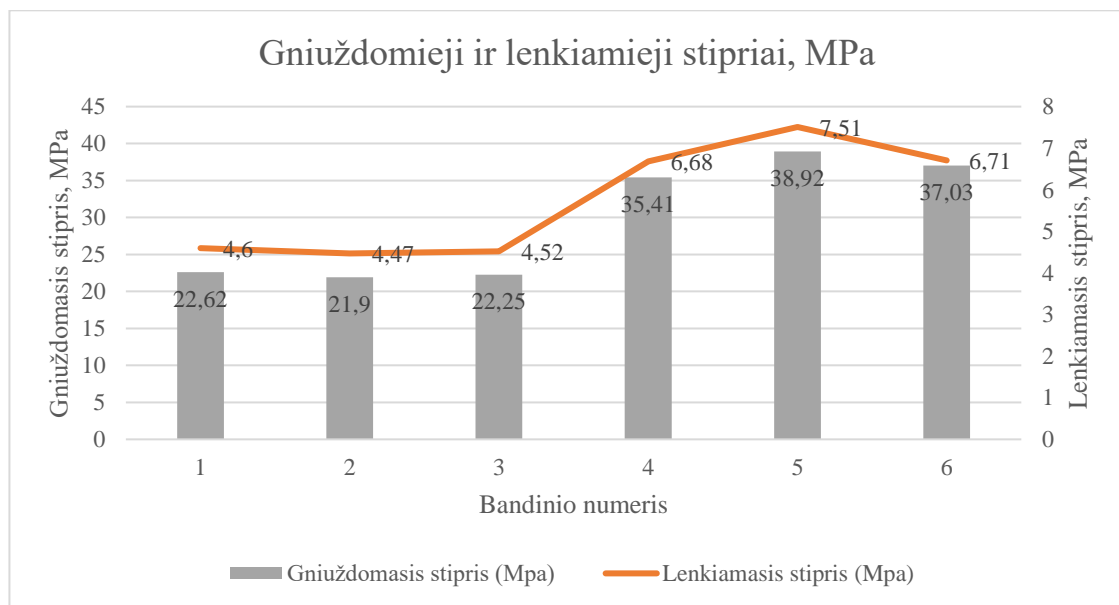
Cementiniai bandiniai buvo kietinami kambario temperatūroje, o becemenčiai buvo 2 paras laikomi 60 °C kietinimo kameroje. Praėjus 14 dienų, bandymas buvo tęsiamas.

Toliau buvo nustatomas bandinių tankis (22 pav.).



**22 pav.** Bandinių tankiai

Bandinių tankiai buvo nustatinėjami naudojantis mechaniniu slankmačiu bei elektroninio skaičiuotuvo pagalba. Tiksli masė buvo nustatyta pasinaudojus elektronines svarstyklės (14 pav.).



**23 pav.** Bandinių gniuždomųjų ir lenkiamųjų stiprių palyginimas

Kaip matome iš gautų mechaninių stiprių rezultatų skirtumas tarp cementinio ir becemenčio betono yra gan aiškus. Cementinio betono gniuždomasis stipris yra 1,72 kartų didesnis, o lenkiamasis stipris 1,68 kartų didesnis nei becemenčio betono. Tačiau atkreipus dėmesį, kad pastarasis bandinys pagamintas daugiausiai iš antrinių žaliavų – rezultatas tikrai stebėtinai geras.

Pirmieji trys bandiniai yra pagaminti iš becemenčio betono. Įdomu tai, kad pirmasis ir antrasis bandiniai yra sluoksniuoti, o trečiasis vientisas. Tačiau rezultatuose tai neatsispindi. Tokią pat tendenciją galima pastebėti ir cementinio betono bandiniuose. Netgi vientisas bandinys parodė prastesnį rezultatą nei sluoksniuotas. Tačiau tai galėjo pasireikšti dėl įvairiausių priežasčių. Taigi,

galima daryti išvadą, kad 15 minučių pertrauka tarp skirtingų betono sluoksnių užliejimo įtakos betono stiprumui neturėjo.



**24 pav.** Becemenčio betono bandinys suformuotas sluoksniais

Kaip matome paveikslėlyje (24 pav.) yra pateiktas becemenčio betono bandinys suformuotas sluoksniais. Vizualiai sunku pastebėti perskyrimą ties viduriu, tačiau atidžiau išžiūrėjus galima pastebėti pabalusio betono ruoželį.



**25 pav.** Cementinio betono bandinys suformuotas sluoksniais

Paveikslėlyje pateiktas taip pat sluoksniuoto betono bandinys, tačiau šis yra sudarytas naudojant cementinį rišiklį (25 pav.). Šiame bandinyje išilgai ties viduriu galime pastebėti kelis įdubimus (ties priekine bandinio plokštuma, kampe). Taip pat viršutinis sluoksnis yra porėtas bei netolygiai

susiformavęs. Taip galėjo atsitikti dėl didelės nesukietėjusio betono klamos ir sankabumo su bandinio formele. Tačiau kaip bebūtų, šie reiškiniai stiprumui įtakos neturėjo.

#### **Antrosios eksperimento dalies išvados:**

1. Tiek cementinio tiek becementinio betono mišiniams 15 minučių laiko tarpas pastebimos įtakos stiprumui neturėjo.
2. Cementinio betono bandinys pasižymėjo lenkiamuoju stipriu – 7,51 Mpa, bei gniuždomuoju stipriu – 38,92 Mpa.
3. Becemenčio betono bandinys pasižymėjo lenkiamuoju stipriu – 4,6 Mpa, bei gniuždomuoju stipriu – 22,62 Mpa.

#### **2.6. 3D robotu atspausdintų sienų skerspjūvio konstrukcinė analizė**

Šiomis dienomis vykdomuosiuose 3D betono spausdinimo projektuose konstrukcinių sprendimų pasitaiko įvairių. Laikančiųjų statinio sienų skerspjūviai turi bene didžiausią įtaką statinio bendrai laikančiajai galiai. Kaip žinia, su dabartinėmis galimybėmis atspausdinto vieno sluoksnio storis kinta nuo 3 cm iki 5 cm. Išspausdinus ištisą sieną tokio storio ji netenkintų konstrukcinių stabilumo reikalavimų ir staigiai sugriūtų. Tam tikslui kombinuojama įvairūs sprendimai, padidinantys betoninių sienų konstrukcinį stabilumą.

Dažniausiai pasitaikantys atvejai yra įvairios sienų skerspjūvio variacijos naudojant tik betoną. Tačiau šiomis dienomis vis plačiau pritaikomos ir kitos medžiagos bendram konstrukciniam darbui su betonu. Naudojama armatūra arba stiklo ar anglies pluošto vamzdeliai sujungti dviem betono sluoksniams nutolusiems vienas nuo kito 10–15 cm. Taip gaunamas didesnis skerspjūvio efektyvumas ir laikomoji galia ženkliai išauga. Dar vienas sėkmingas būdas užtikrinti stabilesnę konstrukciją yra naudoti tokį pat principą, kuris paminėtas anksčiau, tik vietoje armatūros ar stiklo pluošto vamzdelių naudoti atspausdintą betoną ir taip suformuoti du išorinius sluoksnius jungiančią vingiuotą ar kitaip suformuotą juostą. Šis būdas ypač geras, nes visiškai nereikalauja žmogaus įsikišimo ir užtikrinus pakankamą skirtingų juostų susirišimą gaunama patvari konstrukcija. Antrajam būdui papildyti ir užtikrinti ilgesnių nei 2–3 metrų sienų pastovumą naudojami gelžbetoninių kolonų intarpai. Kitaip sakant, atspausdinama tuščia ertmė, į kurią būtų galima patalpinti armatūros karkasą. Po to ši ertmė yra užpildoma betonu ir gaunama padidinto standumo sienos segmentas. Pasinaudojus šiuo būdu nėra būtina projektuoti konstruktyviai stabilesnių pastato sienų, apskritimo ar puslankio formos, kurios gebėtų išlaikyti savąjį svorį (26 pav.). Taip pat dažnai pasitaikantis atvejis, naudojamas 3D betono spausdinimo technologijoje, sienų kampus formuoti apvalius, tam kam išvengti įtempių koncentracijų ties jais. Ties pastato kampu įterpus gelžbetoninę koloną apvalių kampų galima išvengti.



**26 pav.** Apskritos formos siena

Taip pat opi problema konstruojant statinius robotu – ekstruderiu yra aukštingumas. Dauguma pastatų yra iki 2 aukštų arba iki 10 metrų aukštingumo. Taip yra todėl, nes šiuo metu technologija neišvystyta taip, kad galėtų spausdinti didelės laikomosios galios konstrukcijas. Taip pat, kol kas yra sunku sinchronizuoti ekstrudinių betono liejimą kartu su armatūros dėliojimu. Daugumoje atvejų armatūras dėlioja statybvietyje dirbantys darbininkai. Tai nepilnai atitinka 3D spausdinimo technologijos viziją, todėl yra reikalinga ištirti pavojingiausias vietas betoninėje konstrukcijoje ir armatūros poreikį esant skirtingoms sienų skerspjūvio konfigūracijoms.

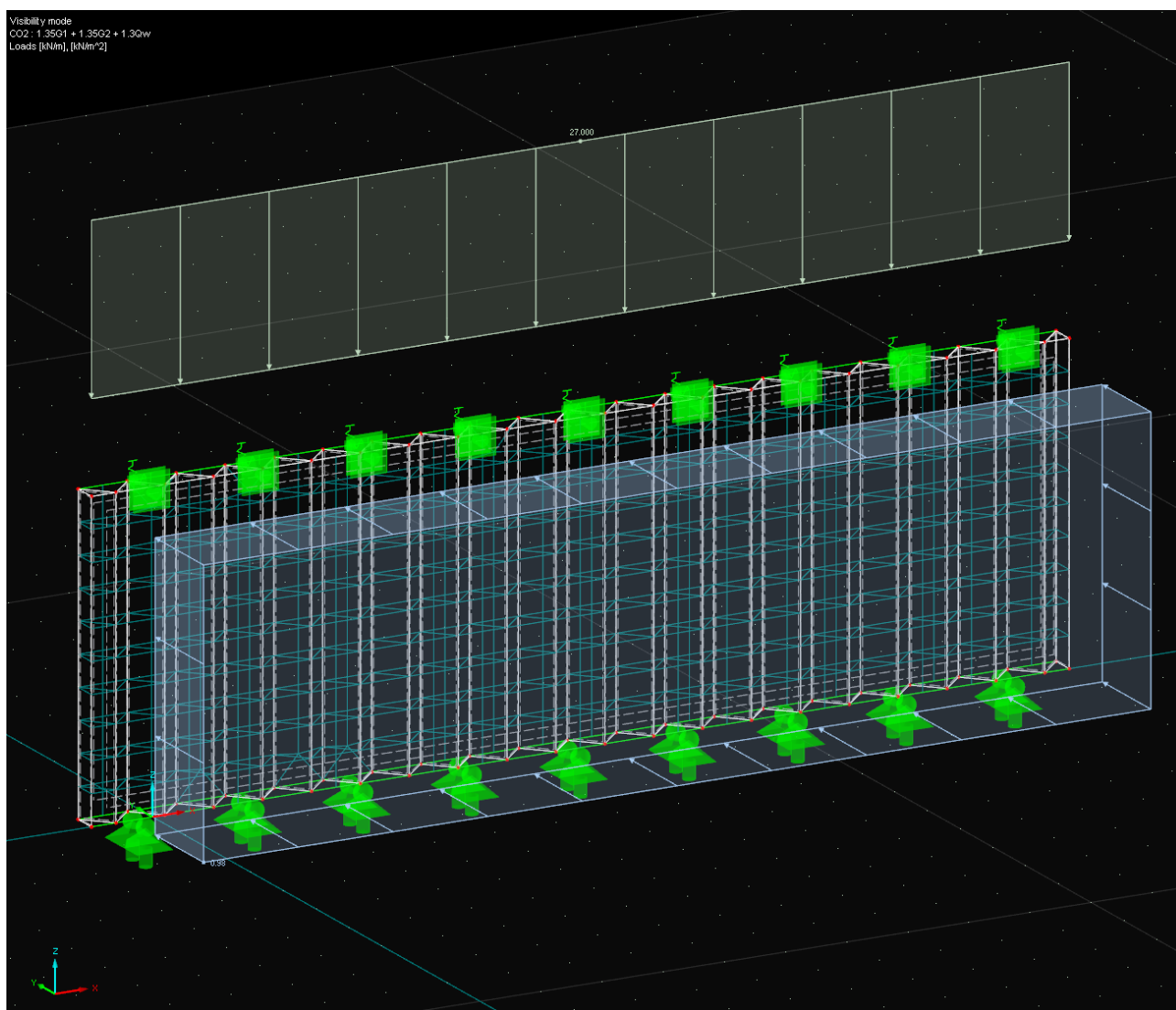
Šiam tikslui buvo kuriamas 3D skaičiuojamasis modelis baigtinių elementų programoje „Dlubal RFEM“. Kol dar nėra ištirti mechaniniai betoninio betono parametrai, bandymui naudojamas C30/37 klasės betonas (27 pav.).

No.	Color	Description
1		Concrete C30/37
<b>Material Constants</b>		
Modulus of elasticity	E :	3300.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]
Shear modulus	G :	1375.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]
Poisson's ratio	ν :	0.200 [-]
Specific weight	γ :	25.00 [kN/m <sup>3</sup> ]
Coefficient of thermal expansion	α :	1.0000E-05 [1/°C]
Partial safety factor	γ <sub>M</sub> :	1.00 [-]

**27 pav.** Bandyme naudotos medžiagos specifikacija

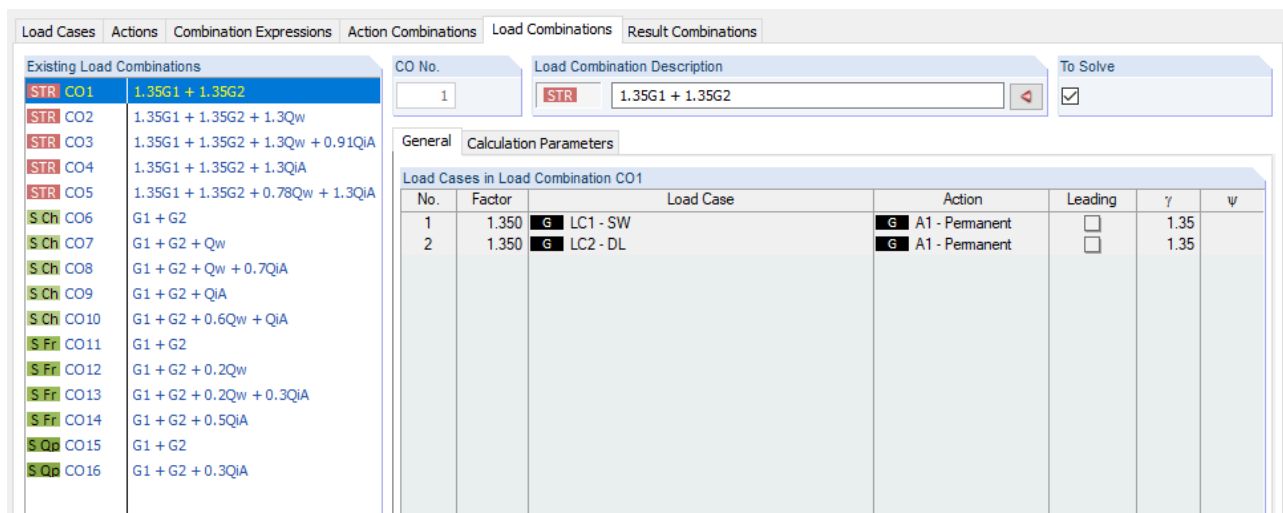
Bandymo objektas yra išorinė laikomoji pastato siena. Visos trys skirtingų skerspjūvių sienos apkrautos vienodomis apkrovomis. Jas sudaro savasis konstrukcijos svoris, nuolatinė apkrova persiduodanti nuo stogo bei vyraujanti vėjo apkrova. Apatinė sienos dalis priimta, kad yra laisvai atremta ant pamato ar žemės, todėl konstrukcinio požiūriu šį atrama yra šarnyrinė, leidžianti konstrukcija pasisukti, bet suvaržanti poslinkius. Viršutinė dalis priimta, kad yra sujungta su stogo konstrukcija. Šiuo atveju įvesta, kad sienos viršutinė dalis gali pasisukti, tačiau negali pasislinkti skersai sienos kryptimi. Kitaip sakant, stogo konstrukcija suvaržo sieną, kad ši negalėtų deformuotis statmena plokštumai kryptimi. Tačiau sienoje gali atsirasti vertikalė deformacija, ji gali pasėsti. Todėl atlaisvinamas vertikalus suvaržymas ir įvedamas spyruoklės standumas, atstojančias realų sienos deformacijos dydį.

Žemiau yra pateikta „trikampės“ formos sienos skerspjūvio skaičiuojamoji schema. Joje matomi dveji linijiniai įtvirtinimai viršutinėje ir apatinėje sienos dalyse (28 pav.). Taip pat matoma vertikalė linijinė apkrova, kuri lygi 27 kN/m. Ši apkrova yra laikinoji naudojimo apkrova. Taip pat mėlyna spalva pavaizduota vėjo apkrova, tenkanti visam sienos plotui. Ji yra lygi 0,75 kN/m<sup>2</sup>. Ji yra horizontalios krypties ir nukreipta +Y kryptimi.



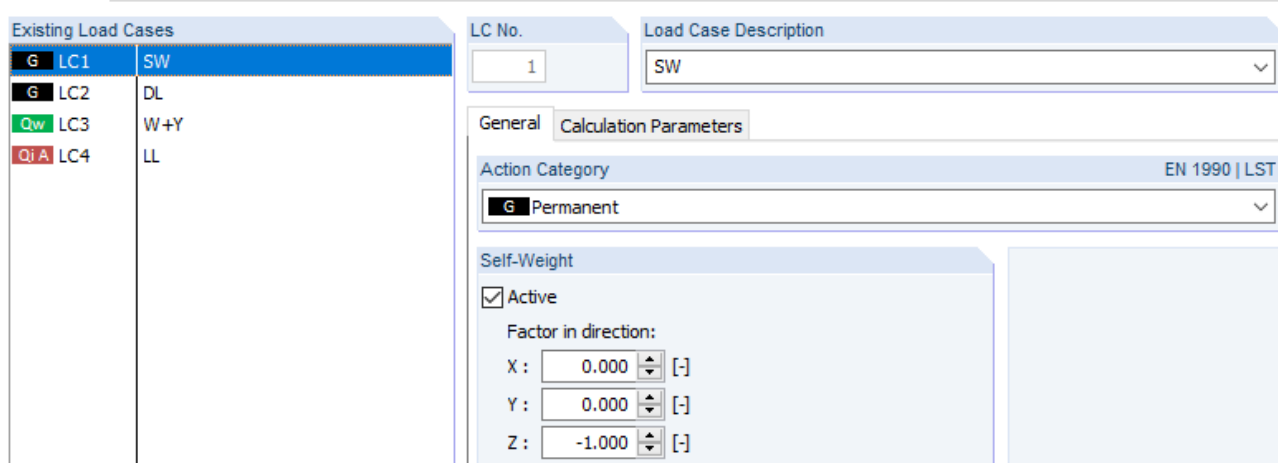
28 pav. Skaičiuojamoji schema

Atliekant konstrukcinės analizės tyrimą naudoti apkrovų deriniai, sudaryti remiantis Euro normų reikalavimais.



29 pav. Konstrukcinėje analizėje naudotų apkrovų derinių sąrašas

Skaičiuotinoje situacijoje naudotos apkrovos pateikiamos žemiau esančiame paveikslėlyje (30 pav.). Pirmoji apkrova yra aktyvus savasis svoris. Tai reiškia, kad automatiškai konstrukcija apkraunama savuoju svoriu. Antroji apkrova yra nuolatinė. Tai kitų konstrukcijų svoris, persiduodantis sienos elementui. Trečioji apkrova yra vėjo sukeltas atitvaros slėgimas. Paskutinioji apkrova yra laikinoji naudojimo apkrova pasireiškianti nuo žmonių vaikščiojimo bei kitų laikinųjų poveikių.



30 pav. Konstrukcinėje analizėje naudotų apkrovų sąrašas

Šioje eksperimentinėje dalyje yra tiriami trys patys populiariausi 3D robotu atspausdintų sienų skerspjūviai. Du iš jų sudaryti tik iš betono, atspausdinto roboto pagalba ir vienas yra kompozitinės sandaros, į konstrukciją įterpus gelžbetoninę koloną.

Pirmasis tyrimo objektas yra „trikampės“ formos sienos skerspjūvis (31 pav.). Konstrukciniu požiūriu ši struktūra primena santvaros modelį, todėl yra labai efektyvi ir nesunkiai išsprendžiama. Tačiau būtina paminėti ir tai, kad tokios formos skerspjūvi sunkiau įgyvendinti praktiškai. Vykstant betono spausdinimo procesui medžiaga paduodama nenutrūkstamai, todėl būtina užtikrinti vienodą betono pasiskirstymą visame sienos plote. O įgyvendinant šią sienos kompoziciją susiduriama su aštriais

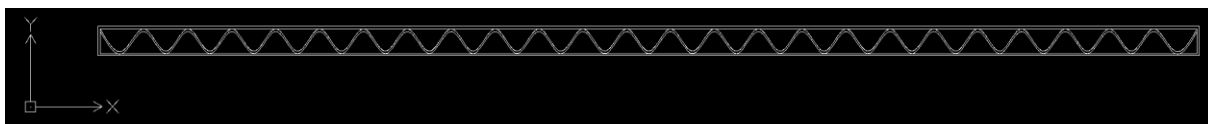


kampais keičiantis vingio krypčiai. Šioje vietoje galimas didelis pavojus betono pertekliui. Todėl šis sienos skerspjūvis praktiškai įgyvendinamas sunkiau ir reikia imtis papildomų priemonių eliminuojant betono perteklių kampuose.



**31 pav.** „Trikampės“ formos sienos skerspjūvis

Kitas eksperimentinėje dalyje nagrinėtas sienos skerspjūvis yra „vingiuotasis“ (32 pav.). Tai technologiškai paprasčiausiai įgyvendinamas sprendimas. Taip yra, dėl to, kad spausdinant betoną nesusidaro medžiagos sancaupų ties išoriniais sienos sluoksniais, nes vidurinė juosta yra vingiuota ir neturi stačių kampų. Taip pat taikant šį principą, išoriniai sluoksniai turi didesnę sąlyčio plotą su vidiniu sluoksniu ir užtikrinamas geresnis sluoksnių sukibimas. Tokiu būdu išvengiama galimų vertikalių nesukibusio betono ruožų, kurie gali pasibaigti trūkumais arba griūtimi. Verta paminėti, kad šis sprendimas yra populiariausias statant mažaukščius 3D betono spausdinimo principu pastatytus statinius.



**32 pav.** „Vingiuotos“ formos sienos skerspjūvis

Paskutinis tyrimo objektas yra „trikampės“ struktūros sienos skerspjūvis su gelžbetoninių kolonų tarpais (33 pav.). Kitaip tariant, atliekant vidinių sluoksnių spausdinimą yra paliekamos stačiakampio ar kvadrato formos ertmės. Į jas patalpinamas armatūros karkasas ir kiaurymė užpildoma betono mišiniu. Stačiakampio formos ertmės atstoja klojinį gelžbetoninei kolonai. Taip gaunami sustandinti sienos ruožai reikiamose vietose. Šis būdas yra technologiškai sudėtingiausias. Jam atlikti papildomai reikia pasiruošti armatūros karkasus, taip pat reikalinga žmogaus darbo jėga armatūros karkasą patalpinant į suformuotą klojinį. Galiausiai, reikalingas skirtingos sudėties betono mišinys skirtas kolonos betonavimui. Kaip bebūtų, šis būdas yra pranašiausias sprendimas norint pastatyti didesnius bei aukštesnius statinius.



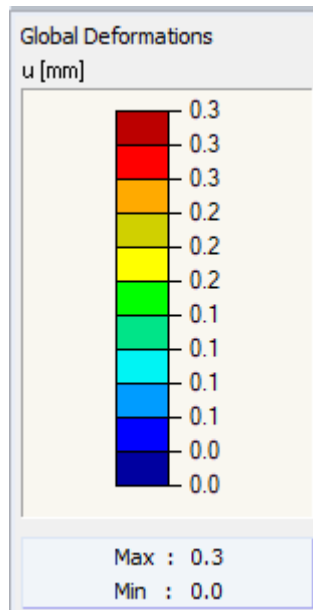
**33 pav.** „Trikampės“ formos sienos skerspjūvis su gelžbetoninėmis kolonomis

Tyrimas atliktas norint išsiaiškinti deformacijų skirtumą tarp trijų sienų skerspjūvių.

### 2.6.1. Konstrukcinės analizės rezultatai

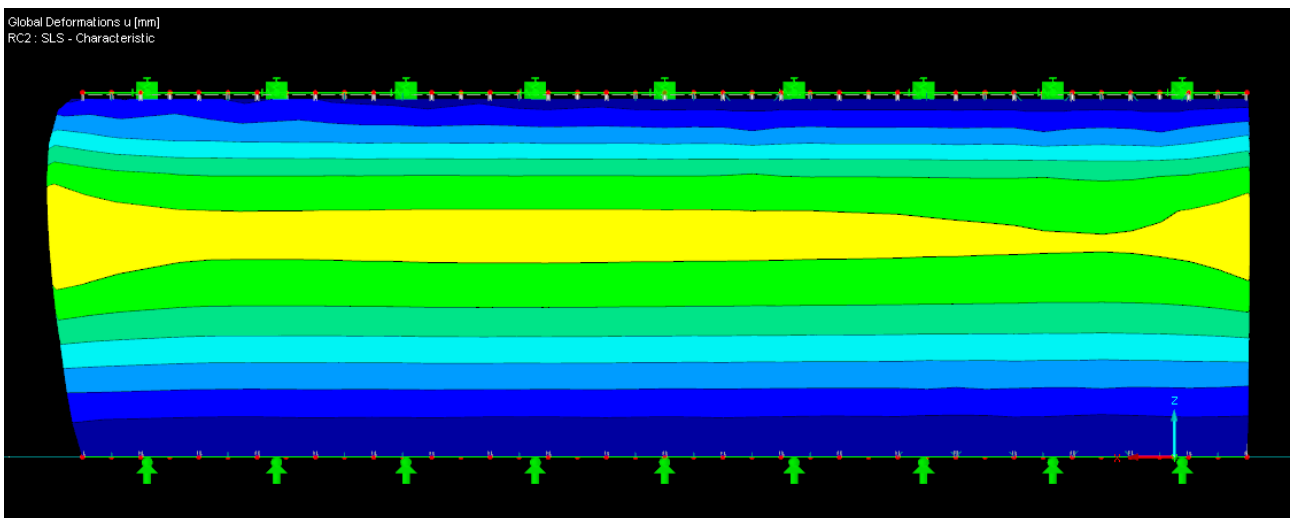
Visos trys skirtingų skerspjūvių sienos buvo sumodeliuotos viename modelyje, todėl globalių deformacijų skalė taikoma viena visoms sienoms. Taip pamatyti skirtumą tarp skirtingų skerspjūvių ir gautų deformacijų yra kur kas paprasčiau (34 pav.).





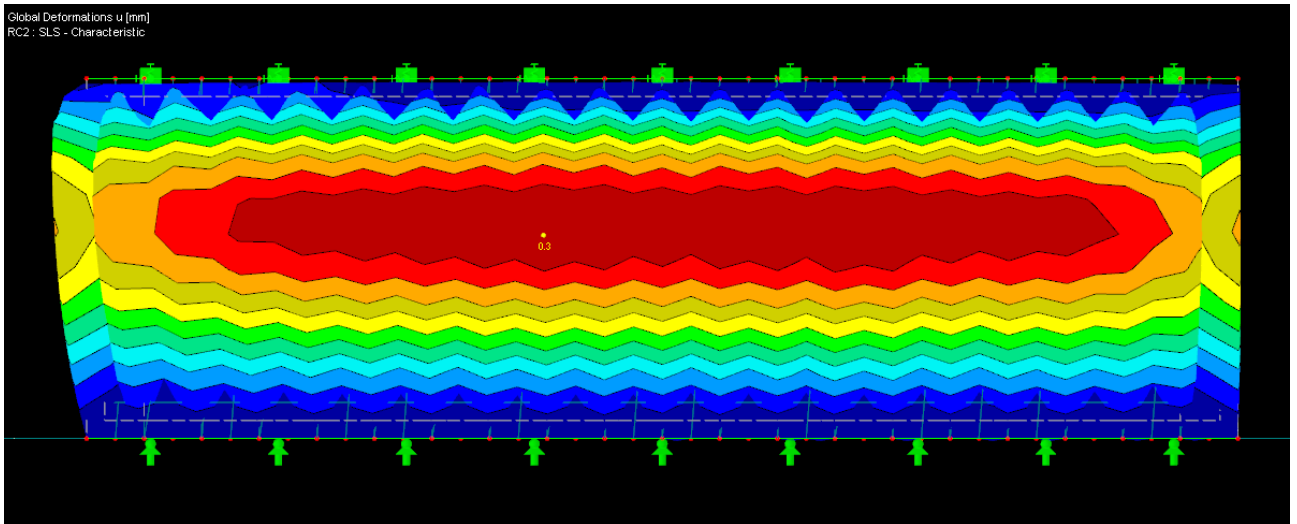
34 pav. Absoliučių deformacijų vertinimo skalė

Žemiau yra pateikta „trikampės“ skerspjūvio sienos formos deformacijos (35 pav.). Kaip matome iš rezultatų didžiausia deformacija yra geltonos spalvos. Remiantis deformacijų skale galima teigti, kad didžiausios šios skerspjūvio sienos deformacijos yra 0,2 mm.



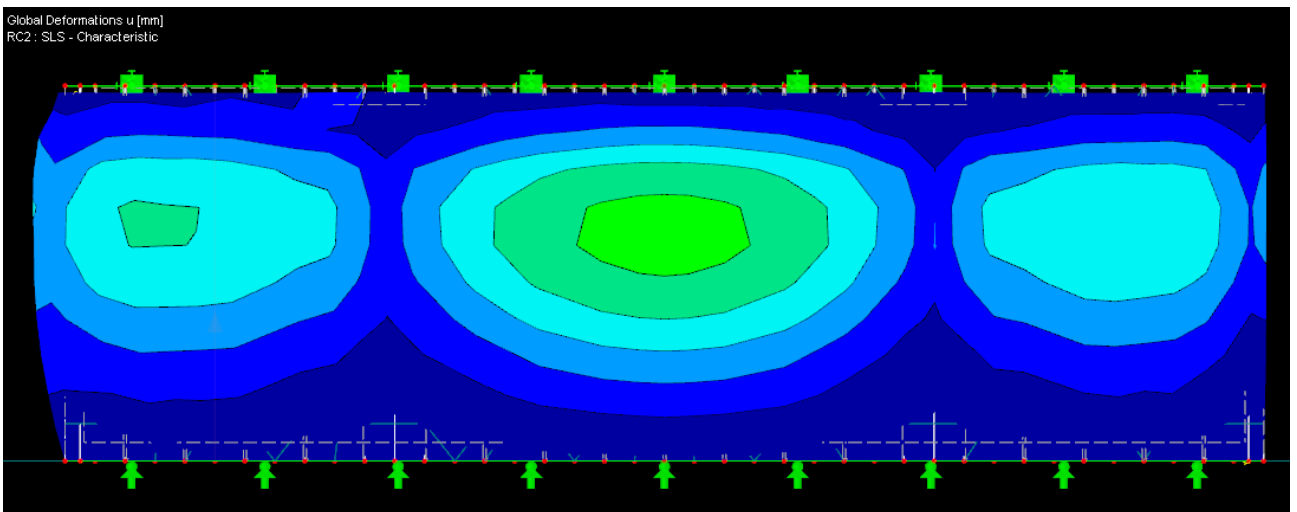
35 Pav. „Trikampės“ skerspjūvio formos sienos deformacijos

„Vingiuotos“ skerspjūvio formos sienos deformacijos (36 pav.) yra gerokai didesnės nei ankstesnės. Deformacijų žemėlapis intensyviau pasiskirstęs ir didžiausia deformacija siekia 0,3 mm. Tai yra 1/3 karto daugiau nei „trikampės“ sienos skerspjūvio deformacija. Kaip ir buvo minima anksčiau, spėjimai pasitvirtino. Santvaros tipo skerspjūvio siena pasižymėjo didesniu standumu, todėl deformacija joje mažesnė.



**36 Pav.** „Vingiuoto“ skerspjūvio formos sienos deformacijos

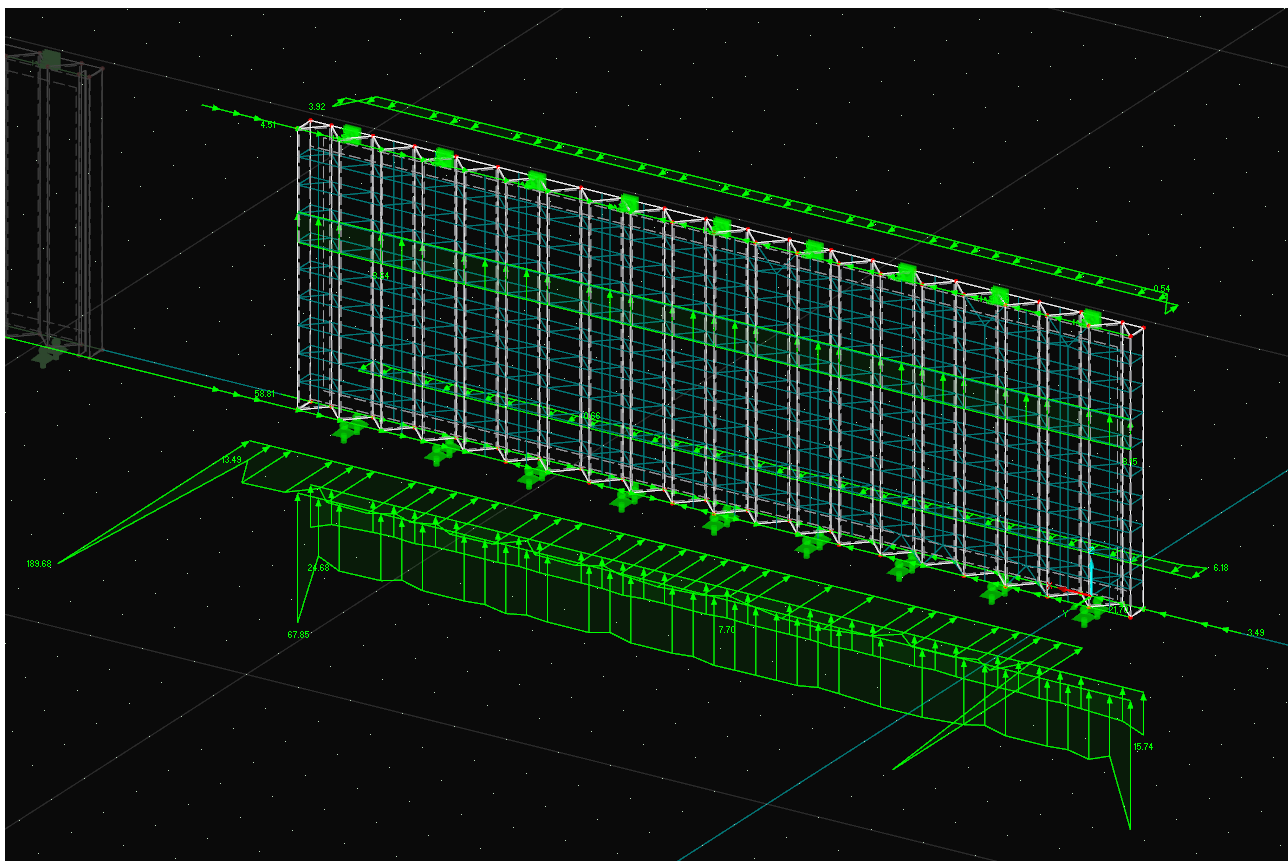
Paskutiniuosius sienos tyrimų rezultatus parodė iš anksto tikėtina rezultata. „Trikampės“ skerspjūvio formos sienos su gelžbetoninėmis kolonomis deformacijos parodė mažiausią reikšmę, kuri nesiekė 0,2 mm deformacijos. Taip pat pagal rezultatų žemėlapi (37 pav.) aiškiai matomos vertikaliai einančios mėlynos spalvos ruožai, kuriuose deformacijos vos pastebimos. Tose vietose yra gelžbetoninių kolonų intarpai. Norint sienos konstrukciją padaryti dar standesne, galima kolonų intarpus suprojektuoti mažesniu atstumu ir taip gauti didesnę konstrukcijos pastovumą.



**37 pav.** „Trikampės“ skerspjūvio formos sienos su gelžbetoninėmis kolonomis deformacijos

Taigi, drąsiai galima teigti, kad „vingiuoto“ skerspjūvio siena nors ir yra paprasčiausiai įgyvendinama praktiškai, tačiau pasižymi mažiausiu standumu. Rezultatai įrodė, kad geresnis variantas yra „trikampio“ formos sienos skerspjūvio kompozicija. Tačiau didžiausias atsparumas statiniams poveikiams gaunamas kombinuojant 3D atspausdintą betoną su gelžbetoninėmis kolonomis.

Žemiau yra pateikta laikančiosios konstrukcijos atramų reakcijų reikšmės (38 pav.).



38 pav. Atramų reakcijų rezultatai

## Išvados

1. Atlikus becemenčio rišiklio eksperimentą nustatyta, kad geriausia rišiklio sudėtis buvo panaudojus lenkiškus lakiuosius pelenus, kurie savo cheminėje sudėtyje pasižymėjo dideliu SiO<sub>2</sub> kiekiu.
2. Atlikus gniuždomojo stiprio tyrimą becementis rišiklis pasiekė 39,63 MPa, tačiau įvertinus fizikines medžiagos savybes reikia pripažinti, kad šiai dienai becementis betonas nėra tinkamas naudoti 3D spausdinimo technologijoje, nes polimerizacijos reakcijai reikalinga temperatūra turi siekti bent 60 °C, o tai užtikrinti statybvietėje yra sudėtinga.
3. Atlikus 3D betono spausdinimo simuliaciją nustatyta, kad 15 minučių laiko tarpas tarp skirtingų betono sluoksnių paklojimo įtakos lenkiamajam bei gniuždomajam stipriui neturėjo.
4. Sumodeliavus tris skirtingus 3D betono spausdintuvu išlietų sienų skerspjūvius programine įranga „Dlubal RFEM“ nustatyta, kad mažiausiu deformavimusi pasižymėjo „trikampio“ skerspjūvio formos siena su gelžbetoninių kolonų intarpais ir maksimali deformacija siekė 0,15 mm.

## Literatūros sąrašas

1. BIRD J. *Exploring the 3D printing opportunity*. Financial Times. 2012, [žiūrėta 2018-12-10]. Prieiga per: <https://www.ft.com/content/6dc11070-d763-11e1-a378-00144feabdc0>
2. WIKIPEDIA. *3D printing*. [žiūrėta 2018-12-10]. Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing#cite\\_note-3D\\_opp-8](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing#cite_note-3D_opp-8)
3. KODAMA H. *A Scheme for Three-Dimensional Display by Automatic Fabrication of Three-Dimensional Model*. IEICE Transactions on Electronics (Japanese Edition) vol. J64-C, No. 4, pp. 41-237, 1981
4. GOLDBERG D. *History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30)*. 2018. [žiūrėta 2018-12-10] Prieiga per internetą: <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>
5. WIKIPEDIA. *Construction 3D printing*. [žiūrėta 2018-12-16]. Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/wiki/Construction\\_3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_3D_printing)
6. REVIEWED. *Chinese 3D Printers Build 10 Houses In One Day*. [žiūrėta 2018-12-16]. Prieiga per: <https://www.reviewed.com/dishwashers/features/chinese-3d-printers-build-10-houses-in-one-day>
7. SASNAUSKAS, Vytautas, Ž. RUDŽIONIS, J. DELTUVA. *Statybinių medžiagų technologiniai procesai*. Mokomoji knyga, „Vitae Litera“. 2007 182p. ISBN 978-9955-686-55-2
8. KTU. *KTU mokslininkai sukūrė betono mišinį statybiniam 3D spausdintuvui*. [žiūrėta 2018-12-27]. Prieiga per: <https://ktu.edu/news/ktu-mokslininkai-sukure-betono-misini-statybiniam-3d-spausdintuvui>
9. STATYBŲ NAUJIENOS. *KTU mokslininkai sukūrė galimybę 3D namų spausdinimui – betruksta prisijungti verslui*. [žiūrėta 2018-12-27]. Prieiga per internetą: <http://www.statybunaujienos.lt/naujiena/KTU-mokslininkai-sukure-galimybe-3D-namu-spausdinimui-betruksta-prisijungti-verslui/7025>
10. WIRED. *The race to build the first 3D-printed building*. [žiūrėta 2018-12-28]. Prieiga per: <https://www.wired.co.uk/article/architecture-and-3d-printing>
11. BBC. *China: Firm 3D prints 10 full-sized houses in a day*. [žiūrėta 2018-12-28]. Prieiga per: <https://www.bbc.com/news/blogs-news-from-elsewhere-27156775>
12. ANIWAA. *The 13 Best Construction 3D Printers In 2019*. [žiūrėta 2018-12-28]. Prieiga per internetą: <https://www.aniwaa.com/house-3d-printer-construction/>
13. LIFEGATE. *The world's first 3D-printed office building is in Dubai*. [žiūrėta 2018-12-28]. Prieiga per internetą: <https://www.lifegate.com/people/lifestyle/worlds-first-3d-printed-office-building-dubai>
14. WEFORUM. *One-quarter of Dubai's buildings will be 3D printed by 2025*. [žiūrėta 2018-12-28]. Prieiga per: <https://www.weforum.org/agenda/2018/05/25-of-dubai-s-buildings-will-be-3d-printed-by-2025>
15. DAVIDOVITS, Joseph. *Geopolymer Cement*. Saint-Quentin : Geopolymer institute, 2013
16. GEOPOLYMER. *World's first public building with structural Geopolymer Concrete*. [žiūrėta 2018-12-28]. Prieiga per: <https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>
17. DEVENDER, Jannie S. J. van, Provis, John L. and Duxson, Peter. Melbourne. *Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement*. Minerals Engineering, 2011 m.

18. SKRIPKIŪNAS, Gintautas. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*. Vadovėlis, „Vitaie Litera“. 2007 182p. ISBN 978-9955-686-50-7
19. GEOPOLYMER. *Paleomagnetism study supports Pyramid geopolymer stone*. [žiūrėta 2018-12-28]. Prieiga per: <http://www.geopolymer.org/archaeology/pyramids/paleomagnetism-study-supports-pyramid-geopolymer-stone-2/>
20. HUA, Xu and DEVENDER, J.S.J Van. *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals*. 2000, Melbourne : Internatinal journal of Mineral Processing, 1999 m., T. 59.
21. HUANG, Yi and Han, MINFANG. *The influence of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on microstructure, mechanical and formaldehyde adsorption properties of fly ash-based geopolymer products*. China University of Mining and Technology, Beijing. Journal of Hazardous Materials, 2011, p. 193, 90–94.
22. UBOLLUK, Rattanasak and CHINDAPRASIRT, Prinya.. *Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer*. Minerals Engineering, Khon 2009 m., T. 22. Prieiga per: Research Gate
23. PALOU, Martin Tchingnable. *Geopolymer Cements and Their Properties: A Review*. Slovak University of Technology In Bratislava. Volume 61 (2014), Number 2, pp. 85 – 100, DOI:10.2478/brj-2014-0007
24. PANDA, Biranchi Suvash Chandra PAUL, Nisar Ahamed Noor MOHAMED, *Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar*. 2017, Singapore Centre for 3D Printing. Prieiga per: Research Gate
25. ZHANG, Da-Wang, Dong-min WANG, Xi-Qiang LIN, Tao ZHANG, *The study of the structure rebuilding and yield stress of 3D printing geopolymer pastes* 2018, China, p. 575-580. Prieiga per: DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.233
26. SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. 2000. *Studies on concrete containing ground waste glass*, Cement and Concrete Research 30(1): 91–100. Prieiga per: DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00213-6
27. KNAUF. *Statybinio gipso techniniai duomenys*. [žiūrėta 2019-05-22]. Prieiga per: <http://www.knauf.lt/produktai-ir-sistemas/produktu-a-z/baugips.html>
28. AKMENĖS CEMENTAS. *Cemento duomenų deklaracija*. [žiūrėta 2019-05-23]. Prieiga per internetą <http://cementas.lt/get.php?f.308>
29. LST EN 206:2013+A1:2017 *Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis: Lietuvos standartas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017.
30. LST EN 12390-7:2009 *Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis: Lietuvos standartas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
31. LST EN 12390-5:2009/P:2011. *Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris: Lietuvos standartas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
32. LST EN 12390-3:2009 *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris: Lietuvos standartas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
33. 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.
34. LST 1428-19:2016 *Betonas. Bandymo metodai. 19 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas vienpusiu užšaldymu ir atšildymu: Lietuvos standartas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.

35. UDODOV, S., GALKIN Y., and BELOV P., *Mechanical and physical properties of fine-grained concrete for concrete additive manufacturing*, Kuban state technological university, ul. Moskovskaya, 2, Krasnodar, 350072 Krasnodar, Russia. E3S Web of Conferences 91, 02041 (2019). Prieiga per: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20/2019910>