



**Kauno technologijos universitetas**  
Statybos ir architektūros fakultetas

# **Lengvų dirbtinių užpildų gamyba ir panaudojimas 3D spausdinimo technologijoje**

Magistro baigiamasis projektas

---

**Fausta Adomaitytė**  
Projekto autorė

**Prof. Vitoldas Vaitkevičius**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**  
Statybos ir architektūros fakultetas

# **Lengvų dirbtinių užpildų gamyba ir panaudojimas 3D spausdinimo technologijoje**

Magistro baigiamasis projektas  
Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Fausta Adomaitytė**  
Projekto autorė

**Prof. Vitoldas Vaitkevičius**  
Vadovas

**Doc. Valdas Paukštys**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Fausta Adomaitytė

## **Lengvų dirbtinių užpildų gamyba ir panaudojimas 3D spausdinimo technologijoje**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Fausta Adomaitytė

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Magistro baigiamojo projekto užduotis**

**Studijų programa:** 6211EX008 STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

**Baigiamojo projekto tematiką (lietuvių k.):**

**LENGVŲ DIRBTINIŲ UŽPILDŲ GAMYBA IR PANAUDOJIMAS 3D SPAUSDINIMO TECHNOLOGIJOJE**

**Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.:** V25-09-28

**(lietuvių k.):**

**LENGVŲ DIRBTINIŲ UŽPILDŲ GAMYBA IR PANAUDOJIMAS 3D SPAUSDINIMO TECHNOLOGIJOJE**

**(anglų k.):**

**PRODUCTION AND USE OF LIGHTWEIGHT ARTIFICIAL AGGREGATE IN 3D BUILDING PRINTING TECHNOLOGY**

**Pradiniai duomenys darbui:**

**Baigiamojo projekto dalys:**

|                          | <b>Atlikti</b>                      |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Įvadas                   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Literatūros apžvalga     | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Metodologija             | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Eksperimentiniai tyrimai | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Analitiniai tyrimai      | <input type="checkbox"/>            |
| Skaitiniai tyrimai       | <input type="checkbox"/>            |
| Ekonominė dalis          | <input type="checkbox"/>            |
| Išvados                  | <input checked="" type="checkbox"/> |

**Kita informacija (pagal poreikį):**

**Vadovas:**

(indėlis 100 %)

Prof. Dr. Vitoldas Vaitkevičius

*pareigos, vardas, pavardė*

*Patvirtinta  
elektroniniu būdu*

**Studentas:**

Fausta Adomaitytė

*vardas, pavardė*

*Patvirtinta  
elektroniniu būdu*

Adomaitytė, Fausta. Lengvų užpildų gamyba ir panaudojimas 3D technologijoje. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptių grupė: inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: lengvi dirbtiniai užpildai, 3D spausdinimas, ekologija, gesintos kalkės.

Kaunas, 2024. 54 p.

### **Santrauka**

Magistro krypties studijų baigiamojo projekto tikslas yra ištirti bei rasti optimaliausią lengvąjį užpildą, kuris būtų tinkamas naudoti 3D spausdinimo technologijoje. Magistro darbas susideda iš teorinės ir eksperimentinės dalių.

Teorinėje dalyje nagrinėjama 3D spausdinimo technologija, ekologijos svarba, lengvų dirbtinių užpildų nauda, jų panaudojimas, apžvelgtas užpildų gaminimo metodas.

Eksperimentinėje dalyje atliktas lengvojo dirbtinio užpildo 3D spausdinimo technologijoje tyrimas. Išbandytos įvairios medžiagos ir atrasta tinkamiausia užpildo sudėtis. Geriausiai keliamus reikalavimus atitiko užpildas, pagamintas iš medžio anglies, gesintų kalkių bei vandens. Su pagamintu užpildu buvo daromi tolimesni tyrimai – buvo gaminami bandiniai su komerciniu 3D spausdinimo mišiniu ir su skirtingų frakcijų užpildais, bei tiriama, kaip skirtingos frakcijos daro įtaką tyrimams.

Magistro baigiamąjį darbą sudaro 3 dalys. Pirmojoje dalyje pateikiama literatūros apžvalga, jos išvados. Antroje dalyje aprašoma teorinė tyrimo dalis. Trečiojoje dalyje pateikiami tyrimo rezultatai.

Adomaitytė, Fausta. Production and Use of Lightweight Artificial Aggregate in 3D Printing Technology. Master's Final Degree / supervisor prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field group: Engineering Sciences.

Keywords: lightweight artificial aggregates, 3D printing, ecology, hydrated lime.

Kaunas, 2024. 54 p.

### **Summary**

The objective of the Master's program's final project is to explore and identify the most optimal lightweight aggregate suitable for application in 3D printing technology. The Master's thesis is structured into theoretical and experimental components.

In the theoretical segment, an examination is undertaken on 3D printing technology, the significance of ecology, the advantages of lightweight artificial fillers, their applications, and an overview of filler manufacturing methods.

The experimental phase involves a study on lightweight artificial fillers within 3D printing technology. Various materials were tested, leading to the discovery of the most suitable filler composition. The filler, composed of wood charcoal, hydrated lime, and water, met the highest requirements. Subsequent investigations were carried out using the produced filler, including the creation of specimens with commercial 3D printing mixtures and fillers of different fractions. The impact of various fractions on the research was also explored.

The Master's thesis comprises three sections. The first part presents a literature review and its conclusions. The second part outlines the theoretical research, while the third part provides an overview of the research results.

## Turinys

|  |    |
|--|----|
| Lentelių sąrašas.....  | 9  |
| Paveikslų sąrašas .....  | 10 |
| Įvadas.....  | 11 |
| 1. Literatūros analizė .....   | 12 |
| 1.1. 3D spausdinimo technologija .....   | 12 |
| 1.1.1. 3D spausdinimo technologija .....   | 12 |
| 1.1.2. 3D spausdintuvo veikimo principas .....   | 13 |
| 1.1.3. 3D spausdinimo technologijos kokybė.....  | 13 |
| 1.1.4. 3D spausdinimo technologija pasaulyje .....   | 14 |
| 1.1.5. 3D spausdinimo technologijos trūkumai .....   | 16 |
| 1.2. Medžiagų mechaninės ir fizikinės savybės .....  | 17 |
| 1.2.1. Anglis .....  | 17 |
| 1.2.2. Kalkės .....  | 18 |
| 1.3. Lengvi dirbtiniai užpildai .....  | 18 |
| 1.3.1. Lengvi dirbtiniai užpildai .....  | 18 |
| 1.3.2. Lengvų dirbtinių užpildų gamyba .....   | 20 |
| 1.3.3. Lengvų dirbtinių užpildų naudojimas.....  | 21 |
| 1.3.4. Lengvų dirbtinių užpildų poveikis šiluminei izoliacijai statybose .....                 | 22 |
| 1.3.5. Ekologinės ir tvarios statybos aspektai naudojant lengvus dirbtinius užpildus .....     | 22 |
| 1.3.6. Technologiniai ir gamybos iššūkiai: naujovių diegimas, gaminimo procesų tobulinimas.... | 22 |
| 1.3.7. Lengvų dirbtinių užpildų nauda aplinkai.....  | 23 |
| 1.4. Pirolizės procesas .....  | 24 |
| 1.4.1. Biomasės pirolizės procesas .....   | 24 |
| 2. Literatūros apžvalgos išvados.....  | 25 |
| 3. Eksperimentinė dalis .....  | 26 |
| 3.1. Tyrimo objektas, tikslas ir uždaviniai .....  | 26 |
| 3.2. Tyrimams naudotos medžiagos bei jų savybės .....  | 26 |
| 3.2.1. Kalkės .....  | 26 |
| 3.2.2. Cementas .....  | 26 |
| 3.2.3. Medžio anglis .....   | 26 |
| 3.2.4. Medžio drožlės .....  | 26 |
| 3.2.5. Vanduo .....  | 26 |
| 3.2.6. Skalūno pelenai .....   | 27 |
| 3.2.7. 3D Spausdinimo mišinys.....   | 27 |
| 3.3. Tyrimų metodai .....  | 27 |
| 3.3.1. Medžiagų smulkinimas.....   | 27 |
| 3.3.2. Užpildų paruošimas .....  | 27 |
| 3.3.3. Užpildų karbonizavimas .....  | 27 |
| 3.3.4. Mišinių maišymas.....   | 28 |
| 3.3.5. Fizikinių savybių nustatymas .....  | 28 |
| 3.3.6. Mechaninių savybių nustatymas.....  | 29 |
| 3.3.7. Betono susitraukimo nustatymo bandymas .....  | 32 |
| 3.3.8. Mikrostruktūros tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu.....                       | 34 |
| 3.4. Tyrimo rezultatai .....   | 34 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4.1. Užpildų gamyba.....   | 34 |
| 3.4.2. Užpildų karbonizacija.....  | 36 |
| 3.4.3. Betoninių prizmių rezultatai .....                                | 37 |
| 3.4.4. Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu savybių tyrimas .....          | 41 |
| 3.4.5. Susitraukimų matavimai.....                                       | 44 |
| 3.4.6. Mikrostruktūros tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu..... | 46 |
| 4. Išvados.....  | 50 |
| Literatūros sąrašas .....  | 51 |
| Priedai.....   | 56 |



## Lentelių sąrašas

|  |    |
|--|----|
| <b>1 lentelė.</b> Užpildų sudėčių aprašymai.....                               | 35 |
| <b>2 lentelė.</b> Sudėčių aprašymai.....                                       | 35 |
| <b>3 lentelė.</b> Sudėčių pastabos .....                                       | 35 |
| <b>4 lentelė.</b> Bandinių kietinimo anglies kameroje rezultatai .....         | 36 |
| <b>5 lentelė.</b> Bazinė betono sudėtis .....                                  | 38 |
| <b>6 lentelė.</b> Betoninių bandinių sudėtys .....                             | 39 |
| <b>7 lentelė.</b> Betoninių bandinių sudėtys procentine išraiška .....         | 39 |
| <b>8 lentelė.</b> Betoninių bandinių bandymo rezultatai.....                   | 39 |
| <b>9 lentelė.</b> Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu sudėtys.....              | 41 |
| <b>10 lentelė.</b> Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu mechaninės savybės ..... | 42 |
| <b>11 lentelė.</b> Bandinių ilgių ir masių matavimų reikšmės.....              | 44 |
| <b>12 lentelė.</b> Susitraukimo rezultatai.....                                | 45 |
| <b>13 lentelė.</b> Masės pokyčio rezultatai .....                              | 46 |

## Paveikslų sąrašas

|  |    |
|--|----|
| <b>1 pav.</b> 3D spausdinimo technologija [7] .....  | 12 |
| <b>2 pav.</b> Schematinis 3D spausdinimo procesas [11].....  | 13 |
| <b>3 pav.</b> Mėginio plyšimas ilgio ir pločio kryptimis [7] .....   | 14 |
| <b>4 pav.</b> 3D spausdintas pastatas Niujorke [7] .....   | 14 |
| <b>5 pav.</b> 3D spausdintuvu spausdintas plūduriuojantis pastatas Čekijoje [7] .....  | 15 |
| <b>6 pav.</b> Pirmasis pastatas spausdintas Vokietijoje [7] .....  | 15 |
| <b>7 pav.</b> 3D spausdintuvu atspausdintas pastatas Milane [7].....   | 15 |
| <b>8 pav.</b> Skirtingų sudėčių ir dydžių dirbtiniai užpildai [25] .....   | 19 |
| <b>9 pav.</b> Tinkamas vandens kiekis [27].....  | 20 |
| <b>10 pav.</b> Dirbtinių užpildų gamyba [28].....  | 20 |
| <b>11 pav.</b> Granuliavimo aparatas.....  | 27 |
| <b>12 pav.</b> Anglies dioksido kamera .....   | 28 |
| <b>13 pav.</b> Gniuždomojo stiprio nustatymas su gniuždymo mašina.....   | 30 |
| <b>14 pav.</b> Lenkiamojo stiprio nustatymas, bandinio apkrovimo schema (1 – apkrovimo ritiniai; 2 – atraminis ritinys; 3 – atraminis ritinys) [45]..... | 31 |
| <b>15 pav.</b> Lenkiamojo stiprio nustatymo mašina .....   | 32 |
| <b>16 pav.</b> Susitraukimų matavimas .....  | 33 |
| <b>17 pav.</b> Skenuojantis elektroninis mikroskopas „HITACHI S-3400N“ .....   | 34 |
| <b>18 pav.</b> Lengvieji užpildai anglies dioksido kamerą (apačioje Nr. 2, viršuje Nr. 3 užpildai).....  | 36 |
| <b>19 pav.</b> Lengvų dirbtinių užpildų skalumo bandymo rezultatai.....  | 37 |
| <b>20 pav.</b> Svorio prieaugio palyginimas prieš ir po karbonizacijos .....   | 37 |
| <b>21 pav.</b> Pagaminti betoniniai kubai.....   | 38 |
| <b>22 pav.</b> Betoninių bandinių tankio palyginimai .....   | 40 |
| <b>23 pav.</b> Betoninių bandinių atsparumo gniuždant palyginimai.....   | 40 |
| <b>24 pav.</b> Bandiniai su 3D spausdinimo mišiniu .....   | 42 |
| <b>25 pav.</b> Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu lenkiamojo stiprio palyginimai .....   | 43 |
| <b>26 pav.</b> Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu gniuždomojo stiprio palyginimai .....  | 43 |
| <b>27 pav.</b> 3D spausdinimo mišinio struktūra su smulkiu užpildu .....   | 44 |
| <b>28 pav.</b> 3D spausdinimo mišinio struktūra su stambiu užpildu .....   | 44 |
| <b>29 pav.</b> Susitraukimų išsidėstymas laike.....  | 45 |
| <b>30 pav.</b> Masės pokyčių išsidėstymas.....   | 46 |
| <b>31 pav.</b> Užpildo Nr. 2 SEM nuotrauka (padidinta 500 kartų).....  | 47 |
| <b>32 pav.</b> Užpildo Nr. 2 SEM nuotrauka.....  | 47 |
| <b>33 pav.</b> Užpildo Nr. 2 SEM nuotrauka, kuriai buvo atlikta EDS.....   | 48 |
| <b>34 pav.</b> Užpildo Nr. 2 EDS ataskaita .....   | 48 |
| <b>35 pav.</b> Užpildo Nr. 2 EDS spektras .....  | 49 |

## Ivadas

Šiuolaikiniame pasaulyje, vartotojiškumas yra viena didžiausių ir aktualiausių problemų. Statybos sektoriuje, ekologijos tema taip pat yra labai aktuali. Netaupiai naudojami ištekliai, netvarus projektavimas, neekonomiškas degalų naudojimas bei gamybos technologijos, išmetančios didžiulius kiekius anglies dioksido, užima svarbų vaidmenį oro teršime [1].

Yra daroma daug tyrimų, tiriančių bei ieškančių įvairių būdų sumažinti taršą statybos pramonėje. Tyrimus galima skirstyti į dvi grupes: eksperimentų bei teorijų grindžiami tyrimai. Teoriniai tyrimai taiko įvairias metodikas praktikoje: statinio informacinis modeliavimas (BIM), papildytoji bei virtuali realybė. Šie metodai ne tik leidžia efektyviau projektuoti statinius, tačiau sutaupo ir statybos kaštus: naudojant tik BIM technologiją, statybos kainą sumažėtų 10 %, projektavimo laikas sumažėtų 15 % bei kokybė padidėtų 35 %. Jeigu naudotumėm ne tik BIM metodą, skaičiai ženkliai padidėtų [2]. Eksperimentinių tyrimų metodas keičią dalį betono užpildų į perdirbtas, jau panaudotas žaliavas, taip sumažindami vartotojiškumą bei apsaugodami gamtą nuo taršos. Tačiau užpildų, gaminamų iš uolienu (tufas, pemza, keramzitas, skalda, žvyras) ir užpildų, gaminamų iš organinių medžiagų (medienos, šiaudų, spalių) mechaninės savybės skiriasi. Dažnai naudojamos yra plastiko atliekos, jos naudojamos tam, kad pratęstų plastiko naudojimo ciklą. Tačiau keičiant dalį užpildų į perdirbtą plastiką, betono stiprumas sumažėja apie 40 % [3]. Keičiant užpildus į žemės riešutų pelenus ir betono mišinyje naudojant bent 10% pelenų, galima pastebėti, jog nei vienas mėginys neturėjo mažesnio nei 20 MPa stiprumo, toks rezultatas rodo, kad iki 10 % žemės riešutų pelenų galima naudoti statybiniam betonui gaminti [4]. Vietoj užpildų galima naudoti ir medienos atliekas: pjuvenas, drožles. Jas naudojant, betono stiprumo mažėjimas nėra labai didelis, stiprumas lieka tarp 30–45 MPa, kurio visiškai užtenka konstrukcijų stiprumui palaikyti [5].

Vis dažniau statybos sektoriuje yra bandoma panaudoti perdirbtas žaliavas. Antrinių žaliavų panaudojimas ne tik taupo finansinius kaštus, bet ir sumažina gamtinių išteklių naudojimą bei taršą. Anksčiau minėti ir atlikti tyrimai ir gauti rezultatai rodo, kad tam tikro kiekio antrinių medžiagų naudojimas ženkliai nesumažina vienos pagrindinių ir svarbiausių betono savybių – stiprumo.

Darbo tikslas – atliekant eksperimentinius tyrimus, įvertinti lengvų dirbtinių užpildų įtaką naudojant 3D spausdinimo technologiją.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti mokslinius straipsnius apie lengvus dirbtinius užpildus bei jų pritaikymą 3D spausdinimo technologijoje;
2. nustatyti pagamintų skirtingų sudėčių lengvųjų kalkinių užpildų fizikines bei mechanines savybes;
3. pagaminti betoninius bandinius su skirtingais dirbtiniais užpildais;
4. pagal atliktus tyrimus išrinkti užpildą, kurio fizikinės ir mechaninės savybės parodė geriausius rezultatus;
5. pagaminti bandinius su 3D spausdinimo mišiniu panaudojant skirtingos frakcijos optimaliausią dirbtinį užpildą bei ištirti bandinių fizikines ir mechanines savybes.

## 1. Literatūros analizė

### 1.1. 3D spausdinimo technologija

#### 1.1.1. 3D spausdinimo technologija

3D spausdinimo technologija – tai technologija ar procesas, kai plonos medžiagos sluoksniai yra dedami vienas ant kito, kuriant trimatį objektą. Sluoksnio storis yra nuo 0,02 iki 2,5 mm [6].



1 pav. 3D spausdinimo technologija [7]

3D spausdinimo technologija buvo sukurta prieš kelis dešimtmečius – ją sukūrė mokslininkai Pietų Kalifornijos universitete [8], tačiau didelio proveržio 3D spausdinimo technologijoje nėra – ji netapo dominuojanti technologija statybų sektoriuje. Pradžioje, technologija buvo labai brangi ir nebuvo pritaikyta bendrajai rinkai. Nors ir šiais laikais ši technologija nėra labai plačiai naudojama, statybos sektoriuje ši technologija yra inovatyvi ir perspektyvi, nes suteikia naujas galimybes projektuoti, gaminti ir statyti pastatus bei konstrukcijas. Ši technologija galėtų keisti dalį tradicinės statybos procesą, tokiu būdu statyba taptų greitesnė, efektyvesnė. Dabar, 3D spausdinimo technologija dažnai naudojama norint utilizuoti didelę dalį medžiagų: plastikas, dervas, gumas, keramika, stiklus, betonus ir metalus [9], o tai galėtų padėti spręsti įvairias ekologijos problemas.

Vienas iš pagrindinių privalumų, kuriuos turi 3D spausdinimo technologija, yra galimybė greitai ir efektyviai kurti unikalius ir sudėtingus geometrinius objektus. Spausdinimo procesas leidžia kurti kompleksines formas ir struktūras, kurios tradiciniais statybos metodais būtų sudėtingos [8]. Tai suteikia architektams ir dizaineriams kūrybinę laisvę, leidžiančią realizuoti įvairiausių projektus, pritaikyti specifiniams poreikiams [9].

3D spausdinimas statybos sektoriuje gali sutaupyti statybos laiką bei išlaidas [7]. Tradiciniai statybos metodai dažnai reikalauja ilgų tiekimo grandinių, didelių sandėlių, brangių transporto išlaidų. Naudojant spausdinimo technologiją, pastatų detalės ir komponentai gali būti gaminami tiesioginėje vietoje, sumažinti poreikį tiekti ir laikyti didelį kiekį konstrukcinių elementų. Taip pat sumažina gaminimo atliekas ir poveikį gamtai [10].

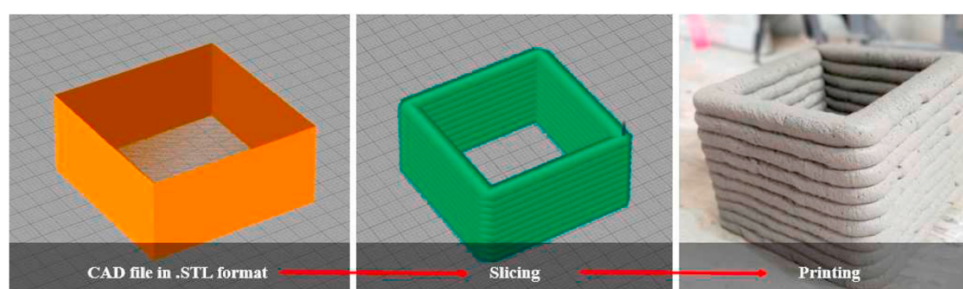
3D spausdinimo technologija statybos sektoriuje dar tik plinta ir turi tam tikrų apribojimų. Vienas iš jų yra didelis spausdinimo mastelio apribojimas – sunku yra spausdinti didelius pastatus [10]. Vis dėlto, su tolesniu technologinio pažangos ir inovacijų vystymusi, 3D spausdinimo technologija gali tapti labai svarbi ir plačiai taikoma statybos sektoriuje. Kitas technologijos minusas – greitis, ypač kai reikalingas aukštas detalumo lygmuo arba spausdinimas objektas yra masyvaus dydžio.

### 1.1.2. 3D spausdintuvo veikimo principas

3D spausdinimas yra inovatyvi technologija, kuri leidžia kurti trimatės objektų fizines kopijas iš skaitmeninių modelių. Tai procesas, kuriame skaitmeninė informacija yra paverčiama realiais, tvariais objektais naudojant specialų įrenginį, vadinamą 3D spausdintuvu [11].

Šis procesas prasideda nuo trimačio modelio kūrimo. Modelis gali būti sukuriamas naudojant specializuotą 3D modeliavimo programinę įrangą. Kai modelis paruoštas, jis pateikiamas 3D spausdintuvui, kuris pradeda formuoti plonus, fizinius sluoksnius, sudarančius norimą objektą [10].

Schematinis 3D spausdinimo procesas pavaizduotas 2 pav.: pirmiausia darbinis failas yra paruošiamas STL formatu, suprojektuojama, kaip bus spausdinama 3D spausdintuvu, galiausiai paruoštas failas yra spausdinimas.



2 pav. Schematinis 3D spausdinimo procesas [11]

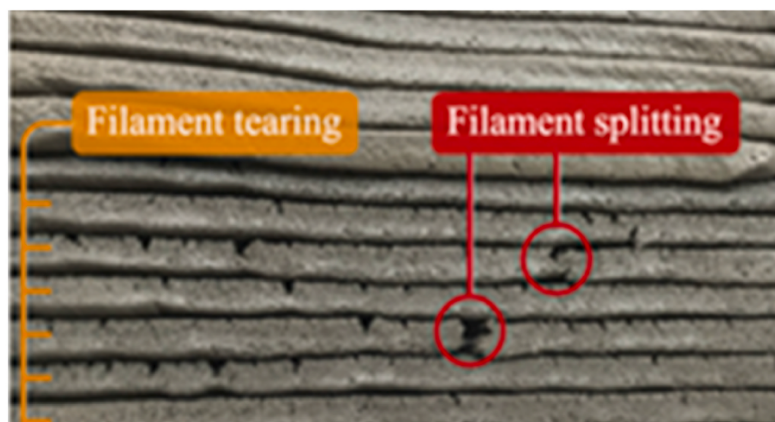
### 1.1.3. 3D spausdinimo technologijos kokybė

3D spausdinimo technologijoje yra svarbu tinkamos medžiagos, tam, kad naudojamas betonas nebūtų per skystas, per klampus, turėtų visas reikalingas mechanines medžiagos savybes ir atspausdintas pastatas išlaikytų reikalingas apkrovas, nesublukštų bei būtų tinkamas eksploatuoti.

2021 metais mokslininkų A. Kazemian, B. Khoshnevis buvo atliktas tyrimas [12], kurio tikslas buvo palyginti kaip skirtingi vandens kiekiai, skirti tam pačiam betono sausam mišiniui, pakeičia galutinio mišinio savybes. Buvo tirti 7 bandiniai, kurie turėjo  $0 \text{ l/m}^3$ ,  $\pm 5 \text{ l/m}^3$ ,  $\pm 10 \text{ l/m}^3$ ,  $\pm 15 \text{ l/m}^3$  papildomo vandens. Rezultatuose buvo matoma, kad naudojant mėginį su papildomu  $15 \text{ l/m}^3$  kiekiu, padidėja ekstruzijos (ekstruzija – tai procesas, kurio metu spaudžiant mišinį per vieną ar kelias siauras angas suspaudžiama tam tikra masė) greitis net 41%, tai atsitinka dėl sumažėjusio mišinio plastinio klampumo. Tačiau kuo vandens bei cemento santykis yra didesnis, tuo mažesnį stiprumą, pastovumą turi bandinys. Tyrimo rezultatai rodo, kad vandens kiekis atlieka svarbų vaidmenį tinkamo 3D spausdinimo technologijoje naudojamo betono mišinio gamybai.

Tyrimas [7], kurį atliko mokslininkas G. H. Ahmend 2023 metais, aprašantis 3D technologijas statybos sektoriuje, taip pat tiria, kokios proporcijos turi būti tarp smulkių ir stambių užpildų, ir tarp vandens ir rišiklio. Pasak tyrimo, projektuotojas susiduria su 2 sunkumais, rengiant tinkamą mišinį: kad mišinys tinkamai tekėtų, reikia didesnio vandens kiekio, tačiau mažesnis vandens kiekis lemia betono didesnę ilgalaikį stiprumą bei gali turėti įtakos mėginio plyšimo ilgio (angl. filament tearing) ar pločio kryptis (filament splitting) (žr. 3 pav.). 3 pav. galima pastebėti, kad sluoksniai tarpusavyje nėra sulipę. Tyrime taip pat pastebėta, kad žmonių darbo jėgos poreikį būtų galima reikšmingai sumažinti, kuris sudaro apie 50 % projekto išlaidų. Taip pat, automatizuota statyba sumažina ir papildomą darbą, kuris atsiranda dėl žmogiškųjų klaidų. 3D spausdinimas gali sumažinti laiko

sąnaudas 25 % lyginant su tradicinės statybos identišku namu. Statant vienbučius gyvenamuosius namus, daugumoje atveju užtenka tik 3-5 žmonių komandos, kadangi pagrindinį darbą atlieka spausdintuvas. Kadangi žmonių kiekis statybų aikštelėje nėra didelis, statybos metu nelaimingų įvykių stipriai sumažėja.



3 pav. Mėginio plyšimas ilgio ir pločio kryptimis [7]

#### 1.1.4. 3D spausdinimo technologija pasaulyje

3D spausdinimo technologija pasaulio mastu pradeda populiarėti, o tai atveria naujas galimybes architektūrai ir statyboms. Naudojant 3D spausdinimo technologiją, buvo sukurti įspūdingi ir žymūs statiniai, kurie sulaukė dėmesio visame pasaulyje.

4 pav. matomas pastatas yra statytas Niujorke, jo kaina yra 300 000 doleriai – 50 % pigiau nei tradicinės statybos pastatai. Šis pastatas yra 130 m<sup>2</sup> plotą, turi 3 miegamuosius kambarius, 2 vonias ir garažą. Pastato spausdinimo procesas 48 valandas, statybos – 2 savaites. Šio pastato statyboms buvo reikalinga 3 darbuotojų komanda.



4 pav. 3D spausdintas pastatas Niujorke [7]

5 pav. matomas pastatas yra Čekijoje. Vos 42 m<sup>2</sup> pastatas, kurį sudaro svetainė, virtuvė, miegamasis bei vonios kambariai. Namas buvo statytas ant vandens. Komanda stačiusi šį pastatą teigia, kad šios statybos yra 7 kartus greitesnės nei tradicinių namų – plytų statyba.



**5 pav.** 3D spausdintuvu spausdintas plūduriuojantis pastatas Čekijoje [7]

6 pav. matomas pastatas yra pirmasis Vokietijoje 3D spausdintuvu atspausdintas statinys. Šis pastatas yra 380 m<sup>2</sup>, kurį sudaro 5 butai, bendrosios patalpos bei rūšys. Statyba truko nepilnus metus.



**6 pav.** Pirmasis pastatas spausdintas Vokietijoje [7]

7 pav. matomas statinys yra pastatytas renginiui „Milano dizaino savaitė“. Pastatas buvo statomas vos 7 dienas Milano aikštėje, naudojant perdirbtą betoną. Pastatas yra 100 m<sup>2</sup>, kurį sudaro gyvenamasis plotas, miegamasis, virtuvė, vonia bei stogo terasa. Kiekvienas šio pastato 1 m<sup>2</sup> kainuoja apie 1000 eurų, tačiau manoma, kad kaina sumažės iki 200-300 eurų ateityje.



**7 pav.** 3D spausdintuvu atspausdintas pastatas Milane [7]

### **1.1.5. 3D spausdinimo technologijos trūkumai**

3D spausdinimas yra pristatomas kaip daug žadanti ir inovatyvi technologija, kuri sužavi žmoniją bei statybos specialistus visame pasaulyje, ji turi akivaizdžių privalumų ir turi potencialą tapti masiškai naudojama statybos technologija. Tačiau vis dar yra iššūkių, kurie reikalauja technologinių tobulinimų ir tyrimų.

#### **1.1.5.1. Techninių tarptautinių specifikacijų plėtra**

3D spausdinime naudojami betono mišiniai skiriasi nuo tų, kurie įprastai yra naudojami tradicinėje betono statyboje, skiriasi: žaliavos, liejimo metodai, mechaninės savybės ir kt. Tyrimo metodai bei standartai, naudojami įprastoje statyboje netinka 3D statybai. Pastatų spausdinimo technologijos nestandartinė specifikacija reikalauja naujų nuostatų ir kriterijų, skirtų vertinti mechanines savybes, reologines savybes, ilgalaikį patvarumą, teorinį bei analitinį modeliavimus, gyvavimo ciklo tyrimus. Šiais technologijai turėtų būti sukurta techninės specifikacijos struktūra [13].

#### **1.1.5.2. Mišinio optimizavimas**

Mišiniai, naudojami spausdinimo technologijoje, turi būti patikimi, tvirti bei ilgaamžiai. Pagrindinis iššūkis yra suderinti visas šviežio betono savybes atsižvelgiant į betono spausdinimo technologiją. Mišiniai turi turėti palankias savybes: lengvai pumpuojamas, tinkamas ekstruzijos greitis, maži susitraukimai, matmenų stabilumas. Tačiau dėl skirtingų spausdintuvų charakteristikų, įvairių priedų, mišiniai gali neturėti anksčiau minėtų savybių. Taip pat, betonai, spausdinami 3D spausdinimo technologija, turi anizotropinę struktūrą, tai reiškia, kad skirtingomis kryptimis medžiaga turi skirtingas savybes. Dėl savo struktūros, spausdinimo metu aukštesni sluoksniai elgiasi skirtingai dėl spausdinimo laiko intervalo ir reologinių savybių skirtumų dėl betono sutvirtėjimo [14].

#### **1.1.5.3. Statybos masto apribojimai bei visiškas automatizavimas**

3D spausdintų pastatų bendras matmenų apribojimas yra lemiamas spausdinimo įrenginio dydžio ir sistemos. Didžiausi pasiekiami spausdinimo matmenys gali būti: beveik neribojami judėjimo x ir y kryptimis, bet paprastai siekia apie 10 metrų arba 6 metrų skersmens skrituliai, o z (aukščio) kryptimi didžiausias spausdintuvas gali spausdinti tik iki 6-8 metrų. Dažniausiai 3D spausdintuvai spausdina iki dviejų aukštų pastatus [15]. Visiškas autonominis 3D spausdinimo procesas arba minimalus žmogaus įsikišimas yra pagrindinis iššūkis su kuriuo susiduriama, taip pat kuriant 3D spausdinimo technologiją, pagrindinis tikslas buvo sukurti technologija, kuri galėtų be žmogaus įsikišimo veikti. Tačiau šis tikslas nebuvo įgyvendintas, kadangi žmogaus pagalbos reikia – armatūros rankiniai montavimas, drenažo bei vandens, nuotekų sistemų vamzdžių išdėstymas, elektros sistemų montavimas ir kt. [16].

#### **1.1.5.4. Armavimo metodai**

Armavimas vis dar yra viena iš pagrindinių kliūčių, trukdančių tapti realia alternatyva tradicinei statybai. Kaip ir įprastas betonai, 3D spausdintas betonai yra silpnas tempime, o stiprus gniuždyme, todėl jai reikalinga armatūra. Sėkmingas armavimo metodas užtikrintų konstrukcinių elementų plastiškumą, geometrinį lankstumą [15].

Literatūroje yra aprašomi įvairūs armavimo metodai: iš anksto į betono mišinį įmaišytus metalinius pluoštus, plieninių strypų ar vamzdžių dėjimą prieš spausdinimo procesą, kabelių naudojimą



spausdinimo metu. Visi minėti armavimo metodai gali puikiai tikti kai kurioms taikymo sritims, tačiau bendru atveju problema lieka neišspręsta, todėl geriausias metodas sprendimas būtų įvairių metodų kombinacija [7].

#### **1.1.5.5. Kainos ir aplinkosaugos keliami klausimai**

Pastaraisiais metais spausdintų namų ir konstrukcijų kainos sparčiai mažėjo dėl spausdintuvų kaštų bei dėl specializuotų įmonių padidėjimo, kadangi išaugo paklausa. Tačiau vis dar yra per anksti palyginti įprastų bei spausdintų namų kainos santykį, kadangi tradicinės statybos namų kaina yra žema, pastatai yra statomi iš vietinių medžiagų, dirbant vietiniams darbininkams, o naudojant 3D technologiją, reikia specialių mišinių, kurie dažnu atveju nebus vietinės kilmės bei darbuotojų, kurie turi būti susipažinę su šia technologija. Mažas aplinkos poveikis gamtai yra puikus 3D spausdinimo technologiją palaikantis veiksnys, tačiau yra alternatyvu, kurios tam tikrais aspektais turi geresnes charakteristikas nei 3D spausdinti namai, pavyzdžiui, „BOXABL“ sulankstomi namai ar „TESLA“ miniatiūriniai namai [7].

### **1.2. Medžiagų mechaninės ir fizikinės savybės**

#### **1.2.1. Anglis**

Anglis yra viena iš labiausiai naudojamų elementų pasaulyje, turinti įvairias mechanines ir fizikines savybes. Šis natūralus elementas turi plačią taikymo sritį nuo pramonės iki kasdieninio gyvenimo [17].

##### **1.2.1.1. Mechaninės savybės**

Anglis yra žinoma dėl savo daugybės mechaninių savybių, kurios leidžia ją pritaikyti įvairiose srityse. Viena svarbiausių anglies mechaninių savybių – kietumas. Anglis yra viena kietiausių natūralių medžiagų, turinčių didelį atsparumą įbrėžimams. Taip pat, anglis pasižymi mažu susitraukimu ar plėtimusi dėl temperatūros pokyčių – reiškia, kad anglis yra pakankamai stabili medžiaga aukštos temperatūros taikymams bei yra atspari korozijai [18].

##### **1.2.1.2. Fizikinės savybės**

Anglis pasižymi unikaliomis fizikinėmis savybėmis, kurios stipriai išplečia jos taikymo galimybes. Anglis pasižymi gera termoizoliacijos laidumo savybe, o tai reiškia, kad anglis geba pernešti šilumą. Ši savybė yra naudinga daugelyje šilumos perdavimo procesų, pavyzdžiui, šildymo sistemose. Dėl šios savybės anglis gali būti naudojama kaip šilumos šaltinis arba kaip šilumos izoliacija, priklausomai nuo konkrečių poreikių [19].

Anglis gali būti tiek elektros laidininkas, tiek izoliatorius, priklausomai nuo būsenos ir struktūros. Dėl šios savybės anglis plačiai yra taikoma elektros pramonėje: elektrodai, anglies pluoštai [19].

Optinės savybės taip pat yra svarbios anglies fizikinių savybių charakteristikoje. Anglis turi tam tikras optines savybes, tokias kaip tamsumas ir skaidrumas. Šios savybės lemia anglies gebėjimą tiek sugerti, tiek atspindėti šviesą. Ši savybė leidžia anglį naudoti įvairiose optinėse sistemose: šviesos filtrai, ryšio technologijos, optinės dangos bei filtrai, optiniai reflektoriai [18].

## 1.2.2. Kalkės

Kalkės yra natūralių mineralų grupė, kuri turi plačias taikymo galimybes ir vaidina svarbų vaidmenį įvairiose pramonės, statybos, agrokultūros srityse. Kalkės yra naudojamos kaip statybinės medžiagos, pH reguliatorius, katalizatorius [20]. Kalkės pasižymi ypatingomis mechaninėmis bei fizikinėmis savybėmis, dėl kurių kalkės tampa nepakeičiamu komponentu daugelyje pramonės sektorių.

### 1.2.2.1. Mechaninės savybės

Kalkės turi mechaninių savybių, dėl kurių yra vertinamos ir plačiai naudojamos įvairiose srityse. Kalkės pasižymi atsparumu deformacijai, leidžia gerai absorbuoti ir išskirti drėgmę, yra malonios tekstūros bei lengvai tirpsta vandenyje. Kalkės yra minkštos bei lengvai šlifuojamos, todėl jas galima lengvai apdoroti [21]. Taip pat, kalkės turi savybę išlaikyti stabilumą bei standumą net esant aukštai temperatūrai. Šios mechaninės savybės padeda kalkėms tapti universaliais ir pritaikoma medžiaga įvairiose pramonės ir inžinerijos srityse [22].

### 1.2.2.2. Fizikinės savybės

Kalkės turi daugybę įdomių fizikinių savybių, kurios padeda joms atlikti įvairias funkcijas. Kalkės yra neorganinės medžiagos. Kalkės yra geros termoizoliacinės medžiagos, nes turi žemą šilumos laidumą ir geba išlaikyti temperatūrą [20]. Taip pat, kalkės turi mažą elektrinį laidumą, todėl gali būti naudojamos kaip izoliacinės medžiagos elektrotechnikoje [22]. Kalkės yra lengvos, turi mažą tankį, todėl tinka naudoti skirtingų tipo konstrukcijose.

## 1.3. Lengvi dirbtiniai užpildai

### 1.3.1. Lengvi dirbtiniai užpildai

Užpildai betone – tai natūralios ir dirbtinės medžiagos, sudarančios betono griaučius. Tai vieni svarbiausių komponentų betone, nes jie suteikia betono mišiniui stabilumą, pastovumą, ilgaamžiškumą bei ekonomiškumą. Užpildų įvairovė yra labai didelė, kadangi yra naudojamos įvairios gamtinės uolienos, dirbtinės medžiagos ar pramoninės atliekos. Naudojant skirtingus užpildus, galima gauti skirtingų mechaninių savybių betonų, tačiau užpildai privalo tenkinti Lietuvos standartų reikalavimus [23]. Europoje 90 % perdirbtų užpildų bei 67 % dirbtinių užpildų yra pagaminama Šiaurės Vakarų Europos šalyse: Belgijoje, Prancūzijoje, Nyderlanduose bei Jungtinėje Karalystėje [24].

Dirbtinius užpildus galima klasifikuoti pagal daug požymių, iš kurių, svarbiausieji yra: kilmė, dalelių stambumas, dalelių forma, tankis, cheminis aktyvumas [23].

Užpildų klasifikacija [23]:

- gamtiniai. Gaunami – perdirbant gamtines uolienas (smėlis, skalda ir kt.);
- dirbtiniai. Gaunami iš termiškai apdorotų uolienu (perlitas, keramzitas, kietosios pramonės atliekos);
- pagal dalelių stambumą:
  - stambieji, kurių dalelių skersmuo  $d > 4$  mm;
  - smulkieji, kurių dalelių skersmuo  $0,063 < d < 4$  mm;
  - mikroužpildai, kurių dalelių skersmuo  $d < 0,063$  mm.
- Pagal dalelių formą

- apskritos;
- skaldytos;
- plokščios.
- Pagal tankį:
  - ypač tankus, kurių tankis  $\rho < 3000 \text{ kg / m}^3$ ;
  - įprastieji, kurių tankis  $3000 < \rho < 2000 \text{ kg / m}^3$ ;
  - lengvieji, kurių tankis  $\rho < 2000 \text{ kg / m}^3$ ;
  - ypač lengvi, kurių tankis  $\rho < 500 \text{ kg / m}^3$ .
- Pagal cheminį aktyvumą:
  - inertiniai. Užpildai, kurie chemiškai nereaguoja su kitais elementais;
  - aktyvūs. Užpildai, kurie chemiškai reaguoja su kitais elementais;
  - latentiniai. Užpildai, kurie gali reaguoti su kitais elementais, jeigu yra palankios tam sąlygos.
- Pagal atsparumą temperatūros poveikiui:
  - atsparūs karščiui;
  - neatsparūs karščiui;
  - degūs.
- Pagal paskirtį
  - skirti betonui;
  - skirti skiediniui;
  - skirti plastikams;
  - skirti klijams ir t.t.

Atskira užpildų grupė – mikroužpildai [23]. Tai yra ypatingai smulkios dalelės. Tokių dalelių dydis dažniausiai būna smulkesnis nei  $100 \mu\text{m}$ . Mikroužpildai naudojami tam, kad pagerinti mišinio grūdelių granulimetrinę sudėtį, padidinti ar sumažinti tūrinį tankį.

Statybinių medžiagų pramonėje dažniausiai yra naudojami mikroužpildai:

- maltos uolienos (smėlis, klintis, kreida, dolomitas ir kt.);
- keramika (maltos keramikos atliekos);
- pramonės atliekos (pelenai, suodžiai, smulkintas šlakas ir kt.);
- stiklas (susmulkintos stiklo atliekos);
- organinės medžiagos (mediena ir pan.).

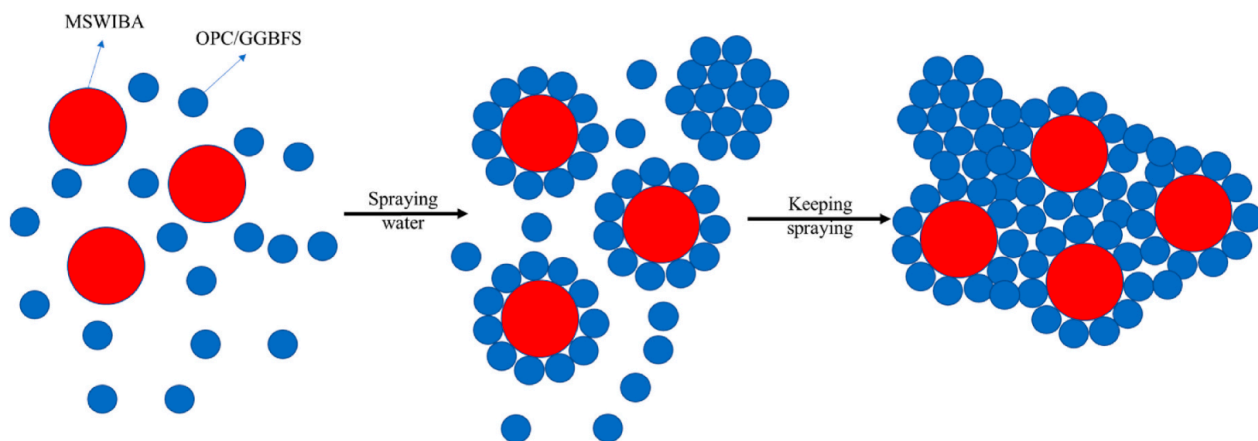


8 pav. Skirtingų sudėčių ir dydžių dirbtiniai užpildai [25]

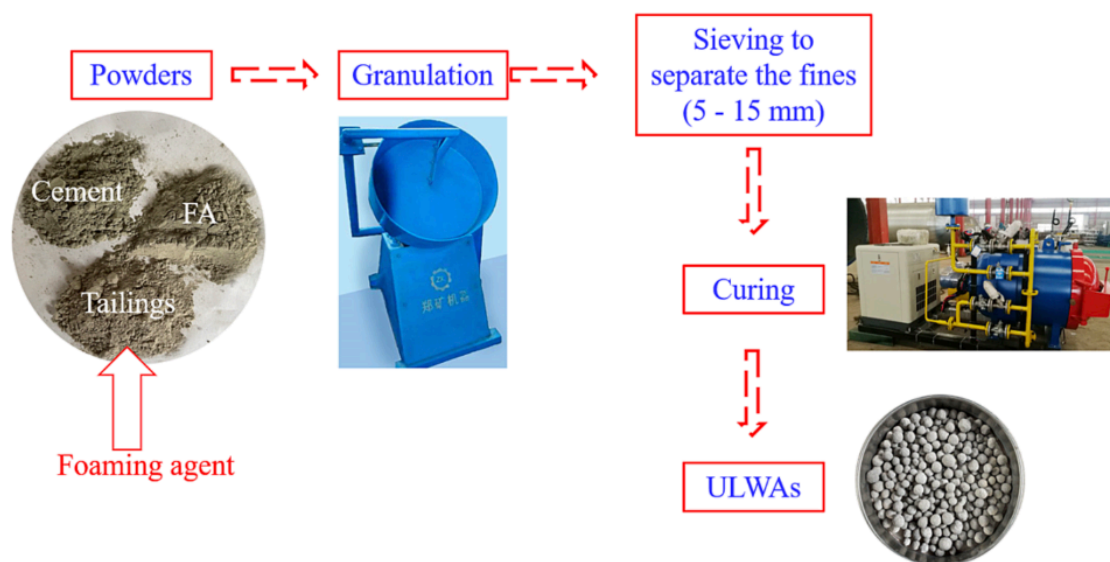
## 1.3.2. Lengvų dirbtinių užpildų gamyba

### 1.3.2.1. Granuliavimo metodas

Tyrimo [26], kurį atliko mokslininkų komanda H. J. H. Brouwers bei P. Tang 2018 metais, gamino dirbtinius užpildus. Tyrime buvo naudotas diskų granulatorius. Disko skersmuo 100 cm, kraštinės aukštis 15 cm, kampas, kuriuo granulatoriaus diskas yra paverstas – 45 laipsnius, veikimo greitis – 35 aps./min. Dirbtiniams užpildams naudojamos smulkintos medžiagos homogeniškai yra sumaišomos, tada dedamos ant veikiančio besisukančio disko. Po 5 minučių veikimo, reikalingas kiekis vandens (žr. 9 pav.) yra nuolat purškiamas ant medžiagų diske.



9 pav. Tinkamas vandens kiekis [27]



10 pav. Dirbtinių užpildų gamyba [28]

### 1.3.2.2. Mėginių džiovimas ir paruošimas

Tyrimo metu [27], po granuliavimo proceso, šviežiai pagaminti dirbtiniai užpildai buvo plonu sluoksniu padėti ant horizontalaus paviršiaus. Mėginiai 2 dienas buvo palikti natūraliam džiovimui kambario temperatūros sąlygomis. Po džiovavimo, reikalingos frakcijos bandiniai buvo filtruojami

metaliniu sietu. Šiame tyrime, didesni nei 4,75 mm frakcijos užpildai buvo pašalinti iš galutinio užpildų mišinio, o likę – tinkamo dydžio užpildai – naudojami tolimesniuose žingsniuose.

### **1.3.2.3. CO<sub>2</sub> kameros veikimas**

Bandiniams buvo atliktas anglies dioksido karbonizacijos bandymas. Šiam bandymui buvo naudota speciali kamera. Anglies dioksido koncentracija kameroje buvo  $20 \pm 3$  %, santykinė oro drėgmė –  $70 \pm 5$  %, temperatūra –  $20 \pm 5$  °C. Bandymui buvo naudojami mėginiai 100 mm x 100 mm x 100 mm dydžio. Karbonizacijos bandymai buvo atlikti po to, kai pagaminti bandiniai buvo laikomi 28 dienas. Po karbonizacijos bandymo užbaigimo, tam, kad patikrinti ar mėginys buvo karbonizuotas, 1 % fenolftaleino reagento buvo purškiamas ant perskelto mėginio skerspjūvio [29].

### **1.3.2.4. Mėginių bandymai**

### **1.3.2.5. Užpildų cilindrinio gniuždomojo stiprumo bandymas**

Bandymas buvo atliktas cilindrinio gniuždomojo stiprumo bandymo prietaisu. 5 litrų talpos indas yra pripildomas reikiamos frakcijos pagamintų dirbtinių užpildų. 5 sekundėms cilindras su užpildais yra padedamas ant vibracinio stalo ir vis pildomas užpildų, kad cilindras būtų pilnai užpildytas. Po cilindro užpildymo, presu yra spaudžiami cilindre esantys užpildai 20 mm, ir fiksuojama, koks slėgis buvo reikalingas, kad suspaustų užpildus [27].

### **1.3.2.6. Vandens kiekio, įsisavinimo bandymas**

Po 28 dienų kietėjimo 20 °C temperatūroje ir 95 % santykinės drėgmės sąlygomis, dirbtiniai užpildai buvo džiovinami orkaitėje 65 °C temperatūroje iki pastovios masės. Tuomet, buvo išmatuota masė bei palyginta prieš džiovimą bei po džiovinimo.

### **1.3.3. Lengvų dirbtinių užpildų naudojimas**

Dirbtiniai lengvi užpildai, tai vis plačiau naudojami užpildai betono gamyboje [30], kadangi ekologijos tema tampa vis svarbesnė ir aktualesnė. Yra siekiama, jog gaminami betono mišiniai būtų gaminami kuo švariau ir tvariau [31]. Į betono mišinį, kaip lengvi užpildai, yra naudojami ne tik tradiciniai užpildai, o ir rečiau naudojami (daugiausia naudojami tyrimuose) ryžių lukštų pelenai, kiaušinių lukštai, molio agregatai [31], kurie pagal tyrimo gautus rezultatus, turi geras mechanines savybes. Bandiniuose labai svarbu yra tinkama vandens sugeriamumas [32]. Taip pat, buvo pastebėta, kad kaitinant iš stiklo pagamintus užpildus, betono mėginiai įgauna geresnių šiluminių savybių, išlaiko savo cheminę struktūrą net bandinį veikiant aukštoje temperatūroje, tačiau bandinio tankis po aukštos temperatūros poveikio padidėja [33].

Tyrimas [34], kurį atliko X. Shang 2021 metais, sprendė kaip tinkamų dirbtinių užpildų pasirinkimas gali padėti spręsti statybos sektoriaus išteklių krizę bei panaudoti statybines atliekas. Tyrimo metu buvo lyginamos pelenų granuliu, molio plytų bei natūralios pempzos užpildai bei jų savybės. Buvo pastebėta, jog dirbtiniai lengvieji užpildai yra tvaresni nei natūralieji užpildai, tačiau tyrime akcentuojama, jog labai svarbu yra naudoti vietinės kilmės žaliavas, kad nesusidarytų dideli kaštai transportavime, kurie yra labai svarbūs vertinant statybos ekologiškumą.

Tyrimas [3], kurį atliko mokslininkų komanda 2022 metais: G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii bei E. H. Fini, sprendė tvarumo klausimą statybos pramonėje. Svarbiausi tvaraus vystymosi statybos sektoriuje tikslai, pasak tyrimo, yra skatinimas atsižvelgti į aplinkos, socialinius ir ekonominius aspektus.

Svarbu rinktis vietinius tiekėjus, panaudoti perdirbtas žaliavas, mažinti išteklių sunaudojimą, tvariai projektuoti, taupyti mašinų naudojamą kurą bei rinktis technologijas, kurios išskiria mažai anglies dvideginio kiekį. Perdirbtos medžiagos galėtų plačiai būtų naudojami ne tik pastatų statyboje, o ir kelio konstrukcijų medžiagoms, drenažo sistemoms, bendram masės užpildymui.

Lengvi dirbtiniai užpildai taip pat yra naudojami hidroižinerijoje, pavyzdžiui, uostų ir krantų konstrukcijose. Naudojant lengvuosius užpildus hidroižinerijoje, svarbu, jog užpildai užtikrintų konstrukcijų ilgaamžiškumą, stabilumą. Taip pat, dirbtiniai užpildai gali būti naudojami kaip pagalbinis hidroižinerijos šilumos izoliacijos sluoksnis hidroižineriniuose statiniuose. Dirbtinių lengvųjų užpildų naudojimas gali prisidėti prie tvaresnės statybos [24].

#### **1.3.4. Lengvų dirbtinių užpildų poveikis šiluminei izoliacijai statybose**

Šiluminė svarbus veiksnys, į kuriuos privaloma atsižvelgti projektuojant pastatus.

Betonas su lengvaisiais užpildais vis dažniau statyboje naudojamas dėl to, kad jis yra lengvesnis, mažesnio tankio, didesnio poringumo ir suteikia geresnę šiluminę izoliaciją nei įprastas betonas. Perdirbtų anglies lengvųjų užpildų naudojimas gerina betono savybes: betonas išlaiko didesnę temperatūrą, mažėja šilumos perdavimo nuostoliai [35].

#### **1.3.5. Ekologinės ir tvarios statybos aspektai naudojant lengvus dirbtinius užpildus**

Optimalus betono užpildų parinkimas gali turėti įtakos tvarios statybos praktikai. Užpildų naudojimas gali padėti susidoroti su išteklių krize ir padėti tvarkytis su kietųjų atliekų tarša.

Tyrime [36], kurį atliko mokslininkai X. Shang, J. Chang, J. Yang ir kiti, lygino dirbtinių užpildų bei natūraliųjų užpildų poveikį aplinkai. Tyrimo metu buvo taikytas metodas, skirtas vertinti medžiagų tvarumą remiantis gyvavimo ciklo vertinimu. Šis metodas įvertino visuomenės poreikius, ekonomines sąnaudas, aplinkos poveikį bei techninį našumą. Tyrimo išvados:

1. dirbtinių lengvųjų užpildų tvarumo indeksas yra geresnis nei natūraliųjų užpildų. Dirbtiniai užpildai pasižymi tvarumu ir gali pakeisti tradicinius užpildus švaresnio betono gamybai;
2. žaliavų tiekimo – paklausos sąryšis turi dideli poveikį užpildų tvarumui. Svarbu rinktis vietinės kilmės žaliavas ir t.t.;
3. nors dirbtiniai užpildai yra tvaresni, tačiau reikia atkreipti dėmesį į galimus aplinkai nekenksmingų žaliavų naudojimo trūkumus. Vietinių žaliavų ar alternatyvų naudojimas bus naudingas siekiant tvarumo, tačiau gali netenkinti konstrukcinių poreikių.

#### **1.3.6. Technologiniai ir gamybos iššūkiai: naujovių diegimas, gaminimo procesų tobulinimas**

Technologiniai ir gamybos iššūkiai turi svarbų vaidmenį sėkmingai naudojant lengvus dirbtinius užpildus. Statybų sektorius siekia įdiegti tvarias ir efektyvias praktikas, todėl inovacijų naudojimas ir pritaikymas tampa būtina ir svarbia užduotimi. Vienas iš pagrindinių dėmesio taškų yra lengvųjų dirbtinių užpildų integracija į statybinių medžiagų gamybos procesus.

Vienas iš iššūkių yra naujovių įdiegimas. Statybos pramonėje vyksta nuolatiniai pokyčiai ir reikalavimai, todėl būtina ieškoti naujų sprendimų ir technologijų. Lengvi dirbtiniai užpildai suteikia galimybę pritaikyti naujas medžiagas, tobulinti jų savybes bei sukurti inovatyvius statybinius

produktus. Tačiau, tai reikalauja nuolatinės mokslinių tyrimų ir plėtros veiklos bei bendradarbiavimo tarp mokslininkų, gamintojų ir statybos specialistų [37]

Kitas iššūkis yra gaminimo procesų tobulinimas. Norint pasiekti tvarios statybos tikslus, svarbu ne tik naudoti ekologiškesnius komponentus, bet mažinti energijos sąnaudas, sumažinti aplinkai kenksmingų medžiagų išmetimą ir optimizuoti gamybos procesus. Lengvi dirbtiniai užpildai turi būti gaminami efektyviai, naudojant kuo mažiau energijos bei išteklių. Tai reikalauja naujų technologijų diegimo, efektyvių gamybos linijų kūrimo ir pažangių gamybos metodų taikymo [37]

Norint įveikti šiuos iššūkius, būtina investuoti į inovacijas, mokslinius tyrimus ir inžinerinius sprendimus. O tai kartu leis plėtoti pažangias technologijas, kurios padės pagerinti lengvų dirbtinių užpildų gamybą ir padidinti jų naują aplinkai. Be to, svarbu skatinti bendradarbiavimą tarp įvairių suinteresuotų šalių, siekiant pasiekti darnios ir tvarios statybos tikslus [37]

Visi šie punktai turi būti vertinami ir įtraukti į statybos sektoriaus transformacija link švarios ir tvarios ateities. Įdiegus naujoves ir patobulinus gaminimo procesus, bus galima pasiekti ne tik aplinkosaugos pranašumų, o ir ekonominių. Šių iššūkių įveikimas leis sukurti naujoviškus statybos sprendimus, kurie prisidės prie ilgalaikės aplinkos apsaugos ir tvarios visuomenės kūrimo.

### **1.3.7. Lengvų dirbtinių užpildų nauda aplinkai**

Lengvi dirbtiniai užpildai turi didelę įtaką mus supančiai aplinkai. Pirma, dirbtiniai užpildai leidžia efektyviai panaudoti atliekas arba antrines žaliavas, taip sumažinant atliekų kiekį ir išteklių sunaudojimą. Taip pat, lengvi dirbtiniai užpildai turi mažesnę tankį, todėl gali prisidėti prie lengvesnio statybinių medžiagų transportavimo, taip sumažinant išmetamųjų teršalų kiekį ir energijos sąnaudas. Be to, tokių užpildų naudojimas turi poveikį ir pastato šiluminėms izoliacinėms, prisidedant prie pastatų šilumos sulaikymo ir sumažinant šildymo arba aušinimo poreikius. Lengvieji dirbtiniai užpildai naudojimas ne tik padeda su aplinkos tarša, bet prisideda prie ilgalaikio ir tvaraus statybos sektoriaus vystymosi [38].

Tyrimas [39], kurį 2021 metais atliko mokslininkų komanda Pietų Korėjoje, gamino lengvus dirbtinius užpildus iš vandens valymo nuosėdų. Geriamojo vandens paklausa dėl sparčiai augančios gyventojų populiacijos ir gyvenimo būdo yra dramatiškai padidėjusi [40], dėl šios priežastis, valymo nuosėdų – dumblių paklausa sparčiai didėja. Dumblas, kuris susidaro vandens valymo procese, buvo išmetamas, tačiau dėl padidėjusios dumblo paklausos bei sąvartyno kaštų, didėja paklausa dumblių perdirbimui. Buvo įvertinti įvairūs metodai valymo nuosėdų perdirbimui. Iš šių nuosėdų galima gaminti cemento kompozitus, betoninius blokus, plyteles bei lengvuosius užpildus. Iš tyrimo išvadų pastebima, kad net ir naudojant dumblą, galime pagaminti užpildus, kurie atitinka užpildų standartus ir turi geras fizikines bei mechanines savybes, taip pat, 28 dienų užpildų stiprumas yra tarp 34,8 iki 21,2 MPa.

Gaminant dirbtinius užpildus ir naudodami jau panaudotas medžiagas ar antrines žaliavas, mes prisidedame prie ekologiškesnio mūsų aplinkos, tačiau gaminant vietoje geriamo vandens naudojimo, galime naudoti vandens valymo nuosėdas – dumblius, o taip dar labiau prisidėtumėm prie atliekų išteklių naudojimo.

## 1.4. Pirolizės procesas

Pirolizė yra cheminis procesas [41], kuris vyksta organinėse medžiagose aukštos temperatūros sąlygomis ir be oro prisotinimo. Tuo skiriasi pirolizė nuo degimo. Šis procesas sukelia medžiagų skilimą, iš kurio atsiranda įvairūs cheminiai produktai, įskaitant anglį, dujas ir skystąją pirolizės produkciją. Svarbu paminėti, kad pirolizė yra daugiau nei tik energijos gavimo būdas – ji taip pat tampa svarbiu tvaraus vystymosi aspektu, leidžiančiu naudoti atsinaujinančius šaltinius bei mažinti poveikį aplinkai. Pirolizės procesą galima taikyti įvairiose srityse, įskaitant energijos gamybą, atliekų valdymą ir chemijos pramonę, taip prisidedant prie tvaraus ir efektyvaus resursų naudojimo.

### 1.4.1. Biomasės pirolizės procesas

Biomasės pirolizė [42] yra kompleksinis procesas, kuris susideda iš kelių svarbių etapų:

1. biomasės paruošimas. Įvairi augalinės kilmės medžiaga (mediena, žolės ir t.t.) yra tinkamai paruoštos: dažnu atveju medžiagos yra smulkinamos, užtikrinamas reikiamas medžiagų drėgnumas. Šis žingsnis yra labai svarbus, kadangi tai leis efektyviai įkaitinti medžiagą, pagreitinti skilimo procesą;
2. įkaitinimas. Medžiaga yra įkaitinama aukštoje temperatūroje, dažnai virš 500 °C. Šiluminis poveikis sukelia organinės medžiagos skilimą. Molekulės pradeda skaldytis į mažesnes struktūras. Skilimo metu gaminami produktai priklauso nuo įvairių faktorių, tokių kaip temperatūra, procesų trukmė ir naudojama biomasės rūšis;
3. be orė aplinka. Procesas vyksta be oro, o tai užtikrina, kad biomasė neatsidurtų degimo sąlygose, o skiltų į kitas cheminės reakcijos produkcijas;
4. skilimo produktai. Pirolizės procesas skirstomas į įvairias stadijas, kuriose organinė medžiaga skyla į skirtingus produktus. Anglis, dujos ir skystoji pirolizės produkcija yra svarbiausi pirolizės skilimo produktai;
5. produktų naudojimas. Pagrindiniai pirolizės skilimo produktai yra anglis, dujos ir skystoji pirolizės produkcija. Anglis dažnai naudojama kaip kietojo kuro šaltinis, ypač tvarios energijos gamyboje. Pirolizės metu gaminamos dujos yra naudojamos energijos gamybai. Skystoji pirolizė ateityje gali būti naudojama kaip degalų alternatyva. Šie skilimo produktai yra svarbūs ne tik kaip energijos šaltiniai, bet ir kaip cheminės medžiagos, kurios gali būti integruotos į įvairius pramonės procesus. Pirolizės procesas prisideda ir prie atsinaujinančių išteklių panaudojimo, atliekų valdymo ir aplinkos taršos mažinimo.



## 2. Literatūros apžvalgos išvados

Perskaičius ir išanalizavus mokslinius straipsnius bei tyrimus, galime pastebėti, kad 3D spausdinimo technologija statybos sektoriuje atveria naujas perspektyvas ir yra susijusi su ekologijos aktualumu. Ši inovatyvi technologija suteikia galimybę greitai ir efektyviai gauti įvairaus dydžio ir formos konstrukcijas, kurios atitinka architekto vizijas.

Vienas iš ekologijos aspektų, susijęs su 3D spausdinimo technologija statyboje, yra medžiagų naudojimas. Dauguma spausdintuvo naudoja specialius spausdinimo medžiagų rinkinius, kurie sudaryti iš dirbtinių lengvų užpildų, perdirbtų plastikų ir pan. Tai reiškia, kad 3D spausdinimo technologija ne tik pagreitina, patobulina statybų procesą, o kartu ir prisideda prie mažesnių žaliavų sunaudojimo ir atliekų mažinimo. Be to, 3D spausdinimas statyboje taip pat sumažina energijos ir išteklių sąnaudas. Ši technologija tiksliai nurodo reikalingą medžiagų kiekį, tai sumažina ir resursų, ir energijos švaistymą, kuris yra būdingas tradiciniams statybos procesams. Vis dėlto, nors spausdinimo technologija turi daug ekonominių ir ekologinių privalumų, svarbu atkreipti dėmesį ir į galimus iššūkius.

Lengvi dirbtiniai užpildai yra ekologiški, nes jie gali būti pagaminti iš perdirbtų arba antrinio poreikio medžiagų, taip sumažinant atliekų kiekį ir mažinant natūralių žaliavų poreikį. Tai padeda išvengti aplinkosaugos problemų ir prisideda prie tvarios statybos. Be ekologiškumo, lengvi dirbtiniai užpildai yra ir ekonomiški. Jų naudojimas gali didinti darbo našumą, sumažinti laiko ir energijos sąnaudas, o jų geresnės izoliacinės savybės leidžia taupyti šilumos energiją. Taip pat, užpildai prisideda prie mažesnio žemės resursų naudojimo ir geresnio atliekų valdymo.

Šios išvados rodo, kad nors dirbtiniai užpildai turi daug teigiamų savybių, tik dirbtinių užpildų naudojimas nepakeis pasaulio ir nepadarys didelio proveržio ekologiškesniam pasauliui. Tam, kad statybos sektorius būtų kuo ekologiškesnis, reikia daug inovatyvių sprendimų, bendro specialistų darbo, daug tyrimų bei daug lėšų, todėl reikia keisti bendrą visuomenės požiūrį į tvarią statybą.

### **3. Eksperimentinė dalis**

#### **3.1. Tyrimo objektas, tikslas ir uždaviniai**

Baigiamojo darbo tyrimo objektas yra lengvo dirbtinio užpildo kūrimas, kuris atitiktų 3D spausdinimo technologijos reikalavimus. Magistriniame darbe siekiama rasti tinkamiausią užpildo sudėtį, kuri išskirs mažiausią anglies dvideginio emisijos kiekį, pasižymės mažiausiu susitraukimo rezultatu ir didžiausiu gniuždomuoju bei lenkiamuoju stipriu.

Darbo tikslas – rasti optimaliausią lengvojo užpildo sudėtį, kuris bus tinkamas naudoti 3D spausdinimo technologijoje.

Baigiamojo projekto uždaviniai:

- lengvų užpildų gamybos eksperimentas;
- fizikinių bei mechaninių savybių nustatymas;
- skirtingų lengvojo užpildo sudėčių;
- tinkamiausios lengvojo užpildo sudėties parinkimas.

#### **3.2. Tyrimams naudotos medžiagos bei jų savybės**

##### **3.2.1. Kalkės**

Kalkės buvo naudotos kaip sudedamoji užpildo dalis.

Kalkės yra natūralių mineralų grupė, kuri yra plačiai naudojama įvairiose gamybos ir pramonės srityse [20]. Bandyme buvo naudotos gesintos kalkės, kurios yra atsparios vandeniui ir šalčiui, tinkamos naudoti tiek vidaus, tiek išorės darbams.

##### **3.2.2. Cementas**

Tyrimo metu buvo portlandcementis CEM I 42,5 N, 42,5 stiprumo klasės portlandcementis.

##### **3.2.3. Medžio anglis**

Medžio anglis buvo naudojama lengviesiems užpildams gaminti. Medžio anglies gabalai buvo susmulkinti su žiauniniu smulkintuvu ir tolimesniuose procesuose naudojami kaip milteliai.

##### **3.2.4. Medžio drožlės**

Medžio drožlės buvo naudojamos lengviems užpildams gaminti. Drožlės buvo naudotos iš medžio drožlių briketų. Drožlės buvo užmerktos dviem būdais: vandeniu ir aliuminio sulfatu ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). Aliuminio sulfatas buvo naudojamas kaip alternatyva vandeniui, nes neutralizuoja cukrų esantį medienoje.

##### **3.2.5. Vanduo**

Baigiamajam darbui buvo naudojamas geriamasis vanduo iš miesto vandentiekio, kuris nėra užterštas chloridų, nitratų, rūdinių priemaišomis. Vanduo atitinka reikalavimus, pateiktus LST EN 1008:2005 reglamente.

### 3.2.6. Skalūno pelenai

Tyrime buvo naudoji skalūno pelenai, gauti iš Kauno kogeneracinės jėgainės. Tai lengvi milteliai, gaunami malant sudegusius pelenus iš jėgainės krosnių.

### 3.2.7. 3D Spausdinimo mišinys

Prizmių bei galutinio 3D bandinio gamyboms buvo naudojamas komercinis spausdinimo mišinys, kurio sudėtis dėl komercinių tikslų nėra viešinama.

## 3.3. Tyrimų metodai

### 3.3.1. Medžiagų smulkinimas

Medžio anglis buvo piršta gabalais, todėl užpildams gaminti netinka dėl per didelės frakcijos. Žiauniniu smulkintuvu, medžio anglis buvo smulkintos iki miltelių pavidalu.

### 3.3.2. Užpildų paruošimas

Užpildai buvo ruošiami granuliavimo būdu. Reikalingos medžiagos pasveriamos. Granuliavimo prietaise (žr. 11 pav.), kuris yra pasviręs 45° kampu, yra maišomos sausos medžiagos. Joms susimaišius, į vientisą miltelių mišinį yra pilamas vanduo. Granuliavimo procesas vyksta apie 5 minutes. Po granuliavimo proceso, paruošti užpildai yra išimami iš granuliavimo aparato ir paliekami džiuoti natūralioje aplinkoje, kurios temperatūra yra  $20\pm 2$  °C ir  $50\pm 5$  % santykinė drėgmė.



11 pav. Granuliavimo aparatas

### 3.3.3. Užpildų karbonizavimas

Tyrime pagaminti užpildai buvo karbonizuojami anglies dioksido kameroje (žr. 12 pav.). Užpildai kameroje buvo 2 paras.

Karbonizacijos kamera palaikė pastovią  $20\pm 2$  °C temperatūrą,  $70\pm 5$  % santykinę drėgmę bei  $\text{CO}_2$   $20\pm 3$  % koncentraciją.



12 pav. Anglies dioksido kamera

### 3.3.4. Mišinių maišymas

Maišymui buvo naudojama maišyklė. Bandymo metu visos medžiagos buvo matuojamos pagal masę. Sudozavus reikiamus medžiagų kiekius, sausos medžiagos sumaišomos tarpusavyje, po 30 sekundžių maišymo, pilami skysti komponentai. Maišoma iki vientisos masės. Gauta masė yra pilama į iš anksto suteptas 40x40x160 mm prizmes. Prizmių formos su pagaminta mase yra dedamos ant vibracinės aikštelės „CMŽ–539“ ir sutankinamos, jeigu reikia, į formą dedama daugiau pagamintos masės ir kartojama tol, kol prizmių forma bus visiškai užpildyta.

### 3.3.5. Fizikinių savybių nustatymas

#### 3.3.5.1. Bandinių kraštinių matmenys

Bandinių kraštinių matmenų nustatymui buvo naudojamas elektroninis slankmatis. Elektroninis slankmatis buvo pasirinktas tam, kad gauti duomenys būtų kuo tikslesni.

#### 3.3.5.2. Masė

Bandinio masei nustatyti buvo naudojamos svarstyklės „KERN PCB“. Jų paklaida – 0,5 g.

#### 3.3.5.3. Tankis

Kiekvienam padarytum galutiniam bandiniui buvo apskaičiuojamas tankis. Tankis – tai bandinio masės ir tūrio santykis:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 3.3.5.1$$

čia

$\rho$  – tankis,  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;

m – masė, kg;

V – tūris, m<sup>3</sup>.

### 3.3.6. Mechaninių savybių nustatymas

#### 3.3.6.1. Skalumo bandymas

Lengvų dirbtinių užpildų skalumo bandymai atliekami pagal LST EN 13055-1:2004 [43] standarte nurodytą metodiką.

Cilindras, kuris padėtas ant vibruojančio stalo, yra pripildomas sausų lengvųjų užpildų iki cilindro viršaus. Po užpildymo, cilindras yra vibruojamas 3 sekundes. Po 3 sekundžių, cilindras vėl pripildomas lengvųjų užpildų ir dar kartą vibruojamas 3 sekundes.

Ant cilindro yra dedamas stūmoklis, kuris su užpildu yra dedamas ant hidraulinio preso. Preso stūmoklio jėga yra didinama, kad per 100 sekundžių pasiektų 50 mm suspaudimą. Gauta ardomoji jėga užrašoma niutonais.

#### 3.3.6.2. Stiprumo gniuždant nustatymas

LST EN 12390–3:2019 standarte nurodomas betono bandinių stiprio gniuždant metodas [44].

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 (žr. 13 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 kryptiai. 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 ±10 % greičiu tol, kol toliau nedidėja. Stipris gniuždant apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f = \frac{F}{A} \quad 3.3.6.2.1$$

čia

F – didžiausia ardomoji apkrova, N;

$f$  – bandinio plotas, kurį veikė gniuždymo jėga, mm<sup>2</sup>.



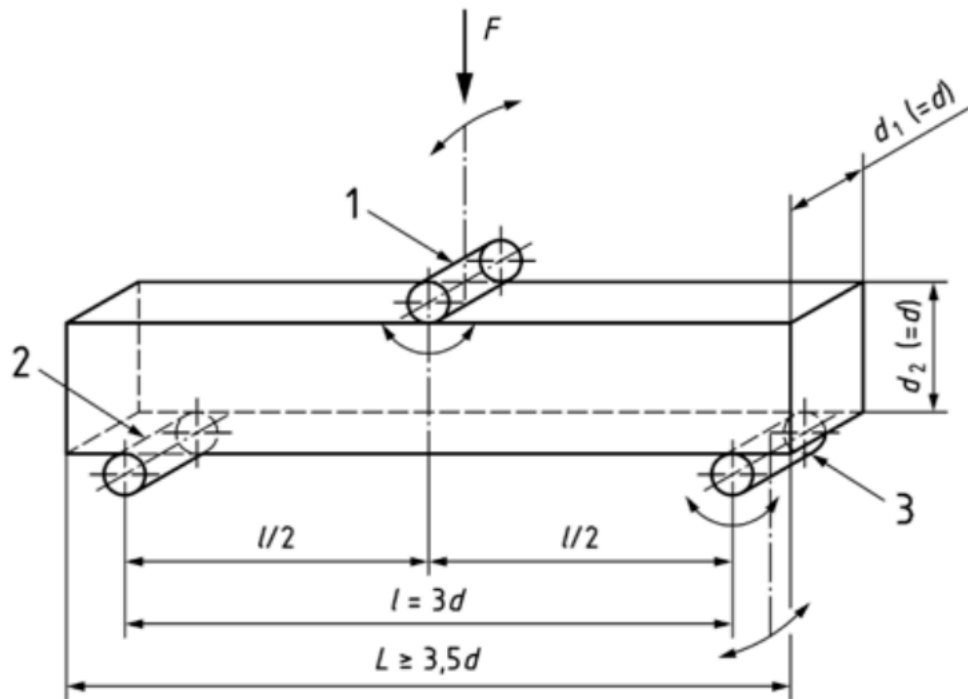
13 pav. Gniuždomojo stiprio nustatymas su gniuždymo mašina

### 3.3.6.3. Lenkiamojo stiprio nustatymas

LST EN 12390 – 5:2009 [45] standarte nurodomas betono bandinių lenkiamojo stiprio nustatymo metodas.

Tyrimams naudojama bandymų mašina turi atitikti EN 12390 – 4 standartus.

Apkrovos perdavimo prietaisas sudarytas iš dviejų atraminių bei viršutinio ritinio, kurie yra pagaminti iš plieno bei kuriais yra tolygiai perduodama ir išskirstoma apkrova. Ritiniai turi gebėti laisvai sukis aplink savo ašį ir gali būti pakreipti plokštumoje, kuri yra statmena bandinio išilginei ašiai. Bandinio apkrovimo schema pavaizduota 14 paveikslėlyje.



**14 pav.** Lenkiamojo stiprio nustatymas, bandinio apkrovimo schema (1 – apkrovimo ritiniai; 2 – atraminis ritinys; 3 – atraminis ritinys) [45]

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.

Prizminės formos bandiniai yra pastatomi centruotai tarp ritinių. Vertikali jėga perduodama bandiniui per viršutinius ritinius. Bandinys suyra dėl atsiradusio lenkimo momento, kuris atsiranda dėl jėgų poros. Fiksuojama maksimali apkrova tenkanti bandiniui bei apskaičiuojamas maksimalus lenkiamasis stipris pagal 3.3.6.3.1. formulę.



**15 pav.** Lenkiamojo stiprio nustatymo mašina

Apkraunant bandinį parenkamas pastovus jėgos didinimo greitis. Apkrova tolygiai be smūgių didinama parinktu pastoviu greičiu  $\pm 1\%$  tikslumu, kol toliau nedidėja [45].

Stipris lenkiant apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_c = \frac{3}{2} \cdot \frac{f \cdot l}{d_1 \cdot h} \quad 3.3.6.3.1$$

čia

$f_c$  – lenkiamasis stipris, MPa;

$f$  – ardomoji jėga, N;

$l$  – atstumas tarp apatinių ritinių, mm;

$d_1$  ir  $h$  – skerspjūvio šoniniai matmenys, mm.

### 3.3.7. Betono susitraukimo nustatymo bandymas

Siekiant įvertinti pasirinktų bandinių susitraukimus, nuspręsta atlikti betono susitraukimo nustatymo bandymą, kuris atliekamas pagal LST EN 12390 – 16:2019 [46] standarte pateiktą metodiką.

Pagrindinis tikslas yra fiksuoti ilgiausios kraštinės ilgio pokytį po 1, 3, 7, 14, 28 dienų ir apskaičiuoti prizmės ilgio bei masės pokytį.

Susitraukimo nustatymo bandymas pradedamas po 24 valandų prizmės kietėjimo. Susitraukimai matuojami specialiu prietaisu (žr. 16 pav.)





16 pav. Susitraukimų matavimas

Gavus prizmės ilgių reikšmės, pagal 3.3.7.. formulę yra apskaičiuojami ilgio pokytį  $\varepsilon_{cs}$ , %:

$$\varepsilon_{cs} = \frac{l(t_0) - l_{cs}(t)}{L_0} \cdot 100 \quad 3.3.7.1$$

čia

$\varepsilon_{cs}$  – ilgio pokyčiai;

$l(t_0)$  – bandinio ilgis po 24 val kietėjimo, mm;

$l_{cs}(t)$  – bandinio ilgis po 1, 3, 7, 14, 28, dienų kietėjimo, mm;

$L_0$  – bandinio ilgis, mm.

Atliekant susitraukimo deformacijų nustatymo bandymą, yra matuojamas ir bandinio masės pokytis  $X_{cs}$ , %, kuris yra skaičiuojamas pagal 3.3.7.2 formulę:

$$X_{cs} = \frac{W_{cs}(t) - W_{(t_0)}}{W_{(t_0)}} \cdot 100 \quad 3.3.7.2$$

čia

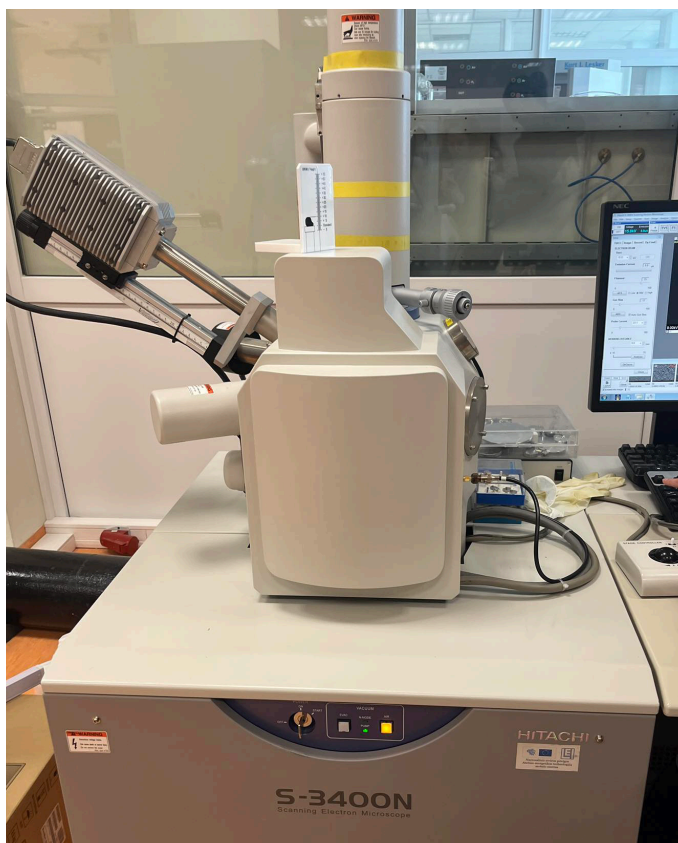
$X_{cs}$  – masės pokyčiai;

$W_{cs}(t)$  – bandinio masė po 24 valandų kietėjimo, g;

$W_{(t_0)}$  – bandinio masė po 1, 3, 7, 14, 28, dienų kietėjimo, g.

### 3.3.8. Mikrostruktūros tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu

Užpildų mikrostruktūros tyrimams buvo naudotas skenuojantis elektroninis mikroskopas (SEM) „HITACHI S-3400N“ (žr. 17 pav.). Šiuo mikroskopu galima skenuoti, tirti ir matuoti mažas daleles, paviršius, mikrostruktūras. Šis mikroskopas gali suteikti labai aukštos raiškos vaizdus, yra pajėgus stebėti nanodetales bei nanomastelius, gali parodyti mėginių paviršiaus topologiją bei sudėtį. Be vaizdavimo, mikroskopas gali būti naudojamas energijos sklaidos spektroskopijai (EDS), taip yra nustatomos cheminės mėginių sudėty.



17 pav. Skenuojantis elektroninis mikroskopas „HITACHI S-3400N“

## 3.4. Tyrimo rezultatai

Šiame skyriuje pateikti laboratorinių tyrimų rezultatai bei jų analizė, kurie buvo atlikti magistro baigiamojo projekto metu.

Magistro baigiamajam darbui buvo iškeltas pagrindinis tikslas – rasti tinkamiausią lengviausią užpildą, kurį bus galima naudoti 3D spausdinimo technologijoje. Šiam tikslui įgyvendinti buvo paruošti 6 skirtingų sudėčių užpildai (žr. 1 lentelę). Tinkami užpildai buvo naudojami gaminant betoną, tiriant betono savybes (žr. 8 lentelę). Radus tinkamiausią užpildą, jis buvo naudojamas kaip užpildas 3D spausdinimo mišiniui ir toliau analizuojamos jo savybės: tankio, susitraukimo matavimai, lenkimo bei gniuždymo stiprumo matavimai.

### 3.4.1. Užpildų gamyba

Užpildai buvo gaminti pagal 3.3.2. skyriaus metodiką. Užpildų sudėty pateiktos 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Užpildų sudėčių aprašymai

| Medžiaga (g)   | Bandinio Nr. |     |     |     |     |      |
|--|--------------|-----|-----|-----|-----|------|
|  | 1            | 2   | 3   | 4   | 5   | 6    |
| Gesintos kalkės  | 400          | 200 | 600 | 500 | 148 | -    |
| Anglis   | -            | 253 |     | -   | -   | -    |
| Medžio drožlės<br>Užmerktos su H <sub>2</sub> O  | 760          | -   | 600 | -   | 412 | -    |
| Medžio drožlės<br>Užmerktos su<br>Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> *4H <sub>2</sub> O | -            | -   | -   | 600 | -   | -    |
| Keramzitas   | -            | -   | -   | -   | -   | 100% |
| Cementas   | -            | -   | -   | 300 | 148 | -    |
| Vanduo   | 100          | 130 | -   | -   | -   | -    |

**2 lentelė.** Sudėčių aprašymai

| Bandinio Nr. | Sudėčių aprašymai  |
|--------------|--|
| 1            | 32% gesintos kalkės, 60% medžio drožlės (užmerktos su H <sub>2</sub> O), 8% vanduo   |
| 2            | 34% gesintos kalkės, 43% anglis, 22% vanduo  |
| 3            | 50% gesintos kalkės, 50% medžio drožlės (užmerktos su Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 4H <sub>2</sub> O)               |
| 4            | 36% gesintos kalkės, 43% medžio drožlės (užmerktos su Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 4H <sub>2</sub> O), 21% cementas |
| 5            | 21% gesintos kalkės, 58% medžio drožlės (užmerktos su Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 4H <sub>2</sub> O), 21% cementas |
| 6            | 100% keramzitas  |

**3 lentelė.** Sudėčių pastabos

| Bandinio Nr. | Sudėčių pastabos   |
|--------------|--|
| 1            | Užpildai nesigavo, buvo naudota per daug vandens. Tolimesniuose tyrimuose nenaudojami                            |
| 2            | -  |
| 3            | Vandens papildomai nebuvo pilta, kadangi medžio drožlės buvo jau užmerktos vandens ir aliuminio sulfato mišinyje |
| 4            | Vandens papildomai nebuvo pilta, kadangi medžio drožlės buvo jau užmerktos vandens ir aliuminio sulfato mišinyje |
| 5            | Vandens papildomai nebuvo pilta, kadangi medžio drožlės buvo jau užmerktos vandens ir aliuminio sulfato mišinyje |
| 6            | -  |

Gaminant bandinius buvo iškilusios pagrindinės problemos – per didelis vandens kiekis granuliavimo aparate, dėl šios priežasties užpildai sulipo į vieną didelę masę, kuri tolimesniuose eksperimentuose yra netinkama naudojama. Taip nutiko su užpildu Nr. 1 – priimtas sprendimas tolimesniuose tyrimuose nebenaudoti papildomo vandens gaminant užpildus su jau užmerktomis medžio drožlėmis, kadangi jos jau prisigėrusios vandens, taip pat užpildas Nr. 1 nebus naudojamas. Pagaminus užpildus, užpildai yra paliekami džiūti natūralioje aplinkoje 7 dienas.

### 3.4.2. Užpildų karbonizacija

Po savaitės džiovinimo natūralioje aplinkoje, dalis užpildų buvo įdėti į anglies dioksido kamerą (žr. 18 pav.). Prieš įdedant ir po išėmimo iš kameros, užpildai buvo pasverti ir patikrinta užpildų laikomoji galia, rezultatai pateikti 4 lentelėje.

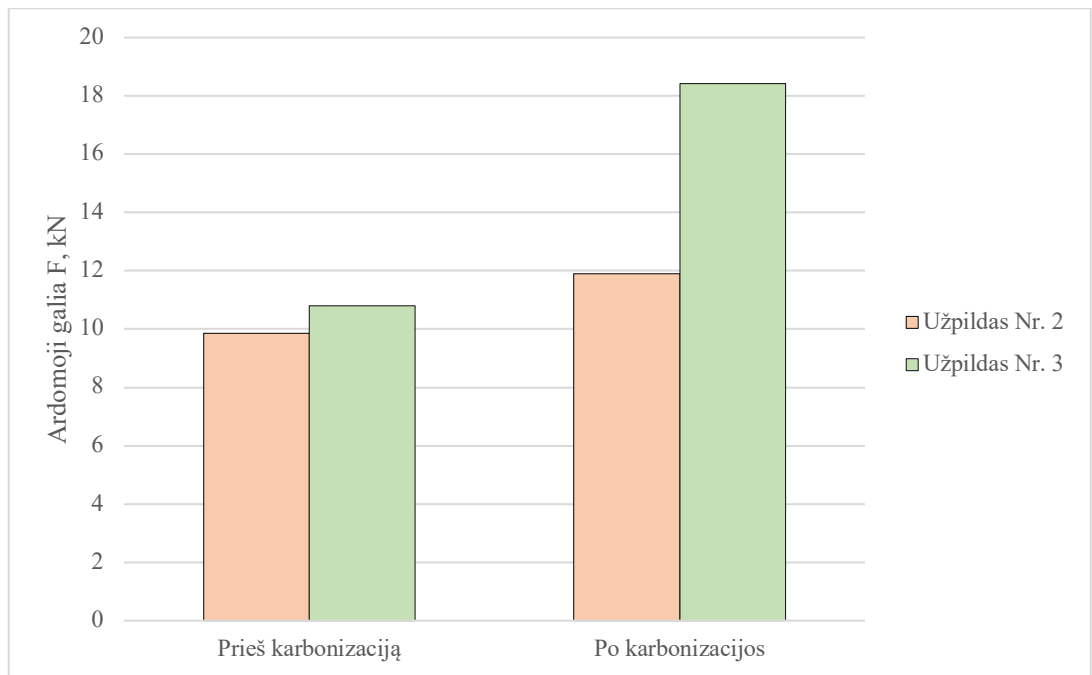


18 pav. Lengvieji užpildai anglies dioksido kamerą (apačioje Nr. 2, viršuje Nr. 3 užpildai)

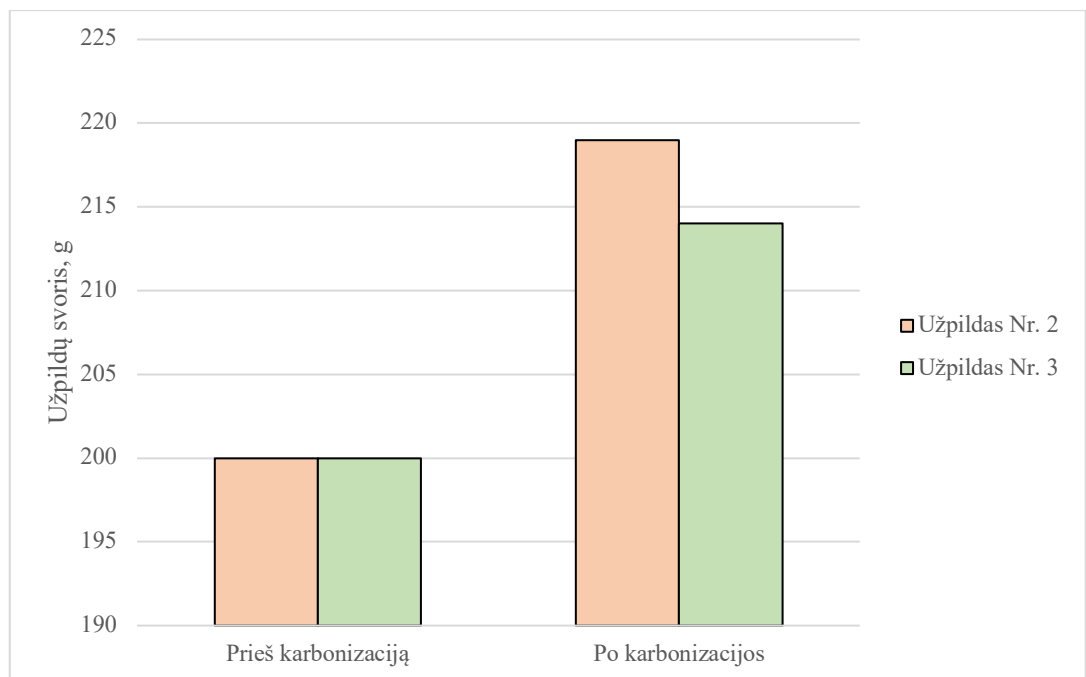
4 lentelė. Bandinių kietinimo anglies kameroje rezultatai

| Užpildo Nr. | Prieš karbonizaciją |                          | Po karbonizacijos |                          |
|-------------|---------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
|             | Svoris, g           | Didžiausia apkrova F, kN | Svoris, g         | Didžiausia apkrova F, kN |
| 2           | 200                 | 10,80                    | 214               | 18,42                    |
| 3           | 200                 | 9,86                     | 219               | 11,90                    |

Iš šių rezultatų daroma išvada, kad užpildas Nr. 3 prisisotino daugiau anglies dioksido, nes užpildų masė padidėjo beveik 10%, tuo tarpu užpildo Nr. 2 masė padidėjo 7%. O užpildas Nr. 2 turi didesnę laikomąją galią, kuri po karbonizacijos proceso padidėjo net 71%, užpildo Nr. 3 laikomoji galia padidėjo 21%.



**19 pav.** Lengvų dirbtinių užpildų skalumo bandymo rezultatai



**20 pav.** Svorio prieaugio palyginimas prieš ir po karbonizacijos

Baigiamojo darbo tikslas yra rasti užpildą, kuris būtų skirtas tinkamiausias naudojant 3D spausdinimo technologiją. Anglies dioksido prisisotinimo palyginime, palankesnis užpildas Nr. 2, kadangi norima gauti kuo didesnę laikomąją galią.

### 3.4.3. Betoninių prizmių rezultatai

Tinkamam užpildų palyginimui, buvo gaminama tos pačios sudėties betonai, tik keičiami užpildai. Su pateiktomis 6 lentelėje sudėtimis, buvo daromi 100x100x100 mm kubai bei D100x100 cilindras, tikslūs bandinių kraštinių, svorio bei laikomosios galios matavimai pateikti 8 lentelėje.

Bandinių formos yra pripildomos skirtingų sudėčių betonais. Pilnai užpildžius formas, jos yra dedamos ant vibracinės aikštelės tam, kad betonai formoje tolygiai pasiskirstytų, neliktų oro tarpų. Po sutankinimo, bandinių formos iki viršaus yra pripildomos betono, ir vėl kartojamas procesas kol formos prisipildo sutankinto betono.

Pateiktos 2 bazinės sudėtis, kurios yra tinkamos pagamintiems užpildams bei keramzitui. Sudėtys pateiktos 5 lentelėje.

**5 lentelė.** Bazinė betono sudėtis

|                        | Portlandcementis CEM I<br>42,5 N | Gamtinis smėlis<br>0,4f | Lengvieji<br>užpildai | Vanduo |
|------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------|
| Pagamintiems užpildams | 11%                              | 50%                     | 27%                   | 12%    |
| Keramzitui             | 11%                              | 57%                     | 18%                   | 13%    |

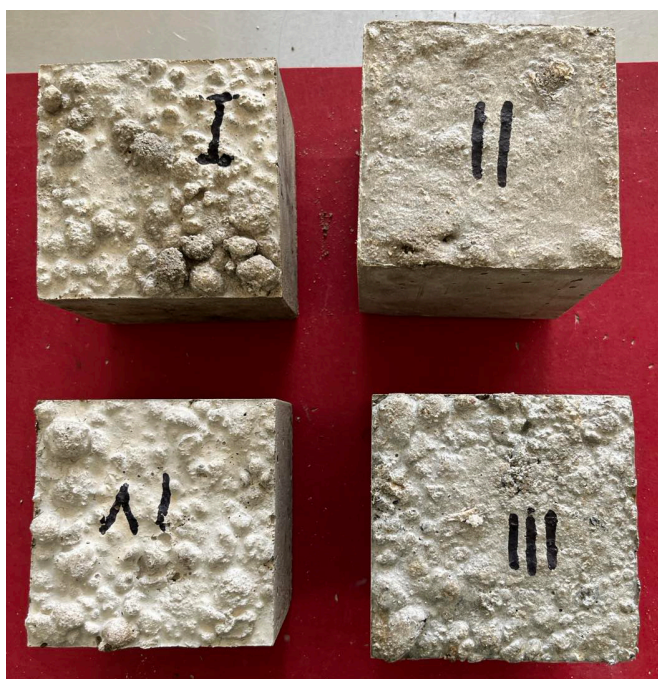
Gaminant betoną su lengvaisiais užpildais, buvo naudojama ši bazinė sudėtis (5 lentelė).

8 lentelėje bandinių žymėjimas:

K – bandinio forma kubas

C – bandinio forma cilindras

Žymėjimas nuotraukose ir lentelėse nesutampa.



**21 pav.** Pagaminti betoniniai kubai

**6 lentelė.** Betoninių bandinių sudėtys

| Medžiaga  | Betoninių bandinių žymėjimas |       |       |       |       |
|---|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|   | K-2.0                        | K-3.0 | K-4.0 | C-5.0 | K-6.0 |
| Cementas (g)  | 150                          | 360   | 150   | 173   | 160   |
| Smėlis (g)  | 825                          | 1620  | 825   | 773   | 750   |
| Vanduo (g)  | 250                          | 525   | 250   | 329   | 330   |
| Plastiklis (ml)                                       | 1,5                          | 3     | 1,5   | 1,5   | 1,5   |
| Užpildas Nr. 2 (kalkės, anglis, vanduo) (g)           | 430                          | -     | -     | -     | -     |
| Užpildas Nr. 3 (kalkės, medžio drožlės, cementas) (g) | -                            | 855   | -     | -     | -     |
| Užpildas Nr. 4 (kalkės, medžio drožlės, cementas) (g) | -                            | -     | 430   | -     | -     |
| Užpildas Nr. 5 (kalkės, medžio drožlės, cementas) (g) | -                            | -     | -     | 410   | -     |
| Užpildas Nr. 6 (keramzitas) (g)                       | -                            | -     | -     | -     | 250   |

**7 lentelė.** Betoninių bandinių sudėtys procentine išraiška

| Medžiaga, %   | Betoninių bandinių žymėjimas |       |       |       |       |
|---|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|   | K-2.0                        | K-3.0 | K-4.0 | C-5.0 | K-6.0 |
| Cementas  | 9%                           | 11%   | 9%    | 10%   | 11%   |
| Smėlis  | 50%                          | 48%   | 50%   | 46%   | 50%   |
| Vanduo  | 15%                          | 16%   | 15%   | 20%   | 22%   |
| Plastiklis  | 0%                           | 0%    | 0%    | 0%    | 0%    |
| Užpildas Nr. 2 (kalkės, anglis, vanduo) (g)           | 26%                          | -     | -     | -     | -     |
| Užpildas Nr. 3 (kalkės, medžio drožlės, cementas) (g) | -                            | 25%   | -     | -     | -     |
| Užpildas Nr. 4 (kalkės, medžio drožlės, cementas) (g) | -                            | -     | 26%   | -     | -     |
| Užpildas Nr. 5 (kalkės, medžio drožlės, cementas) (g) | -                            | -     | -     | 24%   | -     |
| Užpildas Nr. 6 (keramzitas) (g)                       | -                            | -     | -     | -     | 17%   |

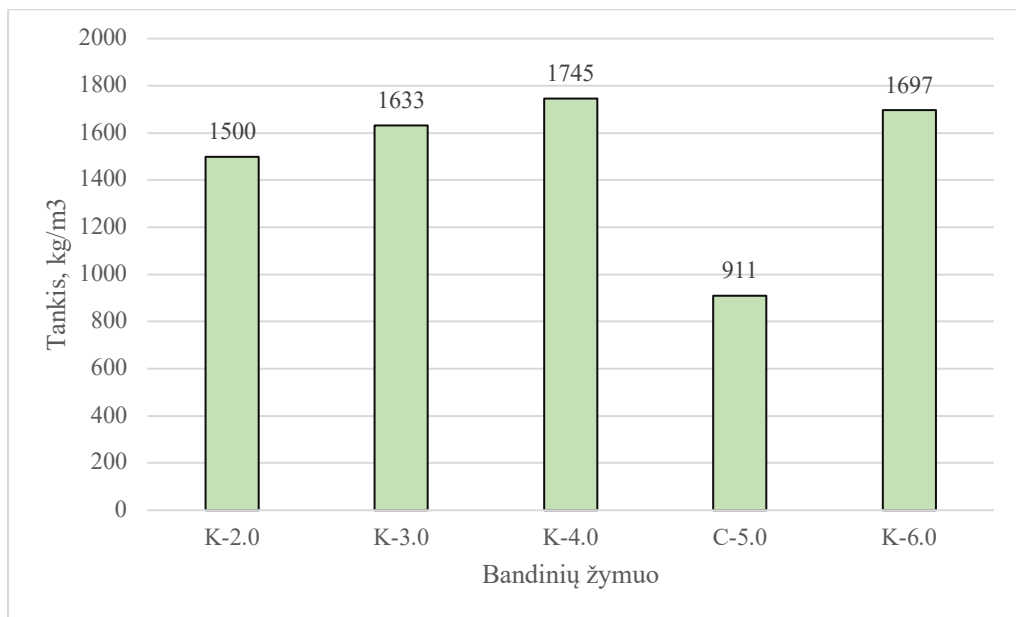
Šio tyrimo tikslas palyginti kaip skirtingi užpildai veikia tą pačią betoninę sudėtį. Palyginti gautą tankį, vandens ir cemento santykį, svorį bei svarbiausią – laikomąją galią.

Visi rezultatai, pateikti 8 lentelėje, buvo atliekami savaite po bandinių pagaminimo ir džiovimo natūralioje aplinkoje.

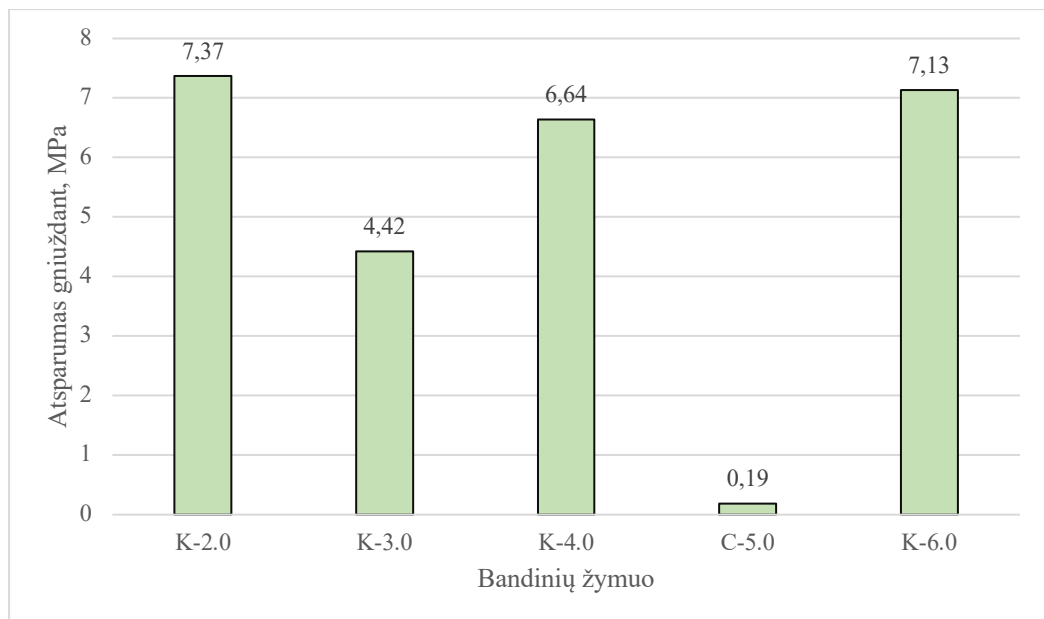
**8 lentelė.** Betoninių bandinių bandymo rezultatai

| Žymuo | V/C  | Tankis, kg/m <sup>3</sup> | Svoris, g | Atsparumas gniuždant, MPa |
|-------|------|---------------------------|-----------|---------------------------|
| K-2.0 | 1,68 | 1500                      | 1547      | 7,37                      |
| K-3.0 | 1,45 | 1633                      | 1661      | 4,42                      |

|       |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|
| K-4.0 | 1,68 | 1745 | 1471 | 6,64 |
| C-5.0 | 1,90 | 911  | 723  | 0,19 |
| K-6.0 | 2,03 | 1697 | 1262 | 7,13 |



**22 pav.** Betoninių bandinių tankio palyginimai



**23 pav.** Betoninių bandinių atsparumo gniuždant palyginimai

Pagal gautus rezultatus (8 lentelė), blogiausiai rezultatus parodė C-5.0 bandinys, kadangi laikomoji galia siekė vos 0,19 MPa.

Geriausią rezultatą parodė mėginys K-2.0, kurio užpildo sudėtis yra 200 g kalkės, 130 g vandens bei 250 g medžio anglies. Bandinio laikomoji galia buvo didžiausia, ji siekė 7,37 MPa. Tankio rezultatai taip pat teigiami (apart C- 5.0 bandinių, kurių stiprumo rezultatai yra visiškai netinkami), jie siekė 1500 kg/m<sup>3</sup>.



Tolimesniuose bandymuose bus orientuojamasi į K-2.0 bandinio sudėtyje naudotą užpildą, tik keičiama frakcija ir tiriama, kaip skirtinga frakcija veikia laikomąją galią gniuždant ir lenkiant, tankį, svorį bei susitraukimus, taip bus nuspręsta, kuri frakcija yra labiausiai tinkama 3D spausdinimo technologijai.

#### 3.4.4. Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu savybių tyrimas

Kuriant prizmes su 3D spausdinimo mišiniu, buvo atlikti 3 maišymai:

1. 100% 3D spausdinimo mišinys
2. 50% 3D spausdinimo mišinio + 50% smulkaus užpildo
3. 50% 3D spausdinimo mišinio + 50% stambaus užpildo

Procentinė dalis buvo skaičiuojama pagal tūrį.

Karbonizuoti užpildai buvo skirstomi pagal frakciją: mažesni nei 6,3 mm priklauso smulkiam užpildui, didesni už 6,3 mm – stambiam užpildui. Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu sudėty pateiktos 9 lentelėje.

**9 lentelė.** Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu sudėty

| Medžiaga, g             | Bandinio Nr. |     |      |
|-------------------------|--------------|-----|------|
|                         | 2.1          | 2.2 | 2.3  |
| 3D spausdinimo medžiaga | 1240         | 585 | 1285 |
| Vanduo                  | 250          | 330 | 330  |
| Smulkūs užpildai        | -            | 270 | -    |
| Stambūs užpildai        | -            | -   | 270  |

Visi bandiniai buvo pagaminti 4 kartus: 3 bandiniai naudoti matuojant lenkimo ir gniuždymo stiprius, 1 bandinys naudojamas susitraukimo matavimams.

Bandinių paaiškinimai:

N – džiuvo normaliomis sąlygomis;

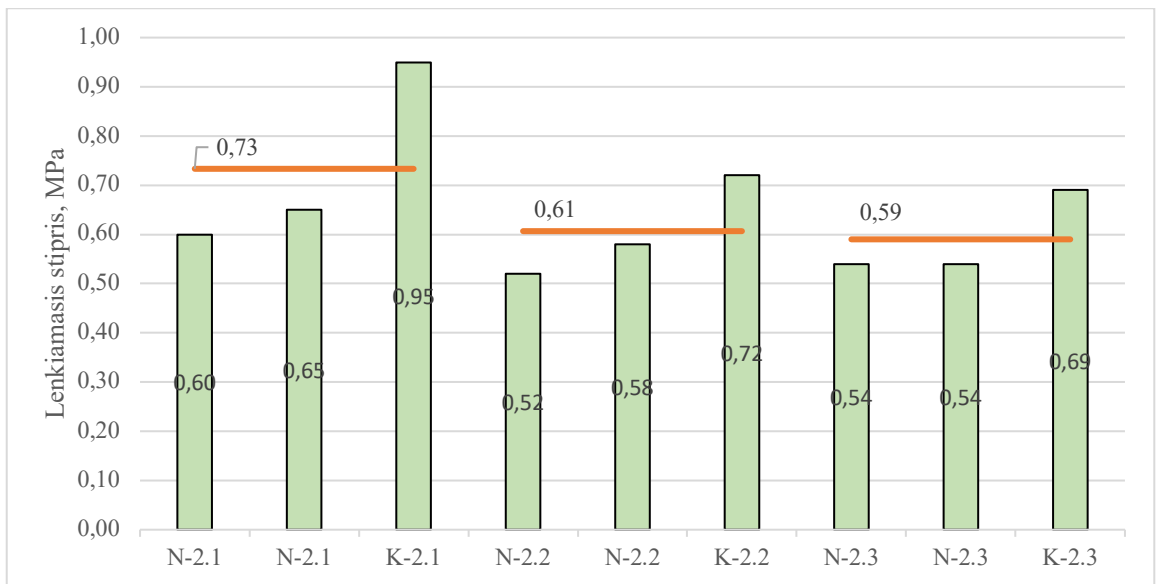
K – džiuvo krosnelėje prie 100 °C 2 paras.



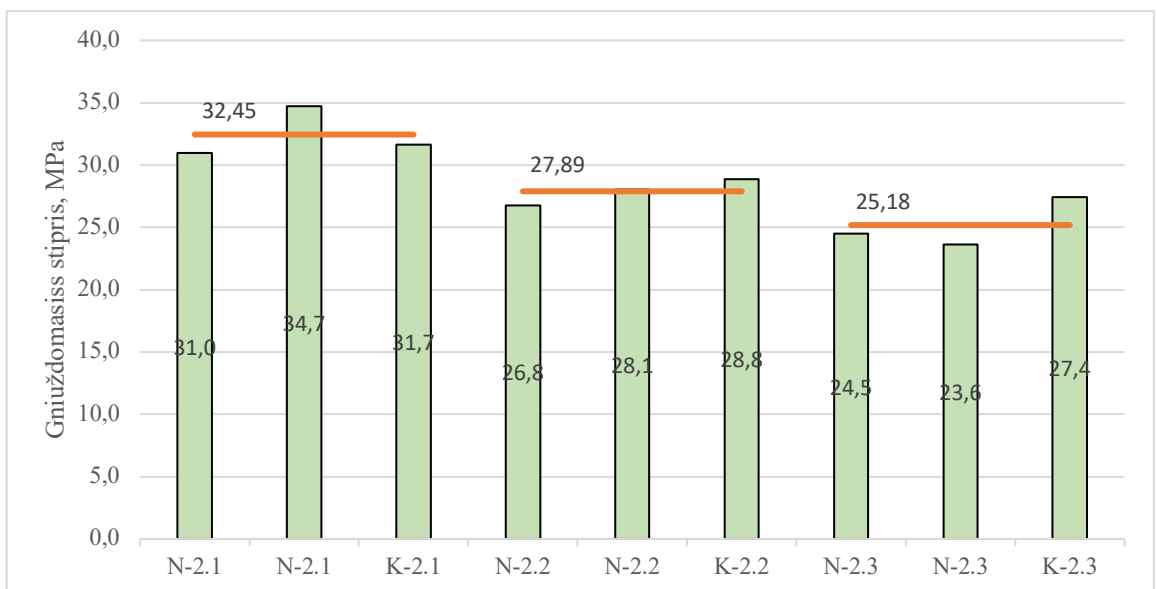
**24 pav.** Bandiniai su 3D spausdinio mišiniu

**10 lentelė.** Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu mechaninės savybės

| Bandinių Nr. | Stipris gniuždant, MPa | Stipris lenkiant, MPa | Tankis, kg/m <sup>3</sup> |
|--------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|
| N-2.1        | 30,9                   | 0,60                  | 1809                      |
| N-2.1        | 34,7                   | 0,65                  | 1864                      |
| K-2.1        | 31,7                   | 0,95                  | 1754                      |
| N-2.2        | 26,8                   | 0,52                  | 1658                      |
| N-2.2        | 28,1                   | 0,58                  | 1687                      |
| K-2.2        | 28,8                   | 0,72                  | 1530                      |
| N-2.3        | 24,5                   | 0,54                  | 1695                      |
| N-2.3        | 23,6                   | 0,54                  | 1655                      |
| K-2.3        | 27,4                   | 0,69                  | 1583                      |



**25 pav.** Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu lenkiamojo stiprio palyginimai



**26 pav.** Bandinių su 3D spausdinimo mišiniu gniuždomojo stiprio palyginimai

25 ir 26 paveikslėliuose pavaizduoti bandinių su 3D spausdinimo mišiniu lenkiamojo ir gniuždomojo stiprių palyginimai bei jų vidurkiai. Gaminiai be užpildų (žymimas „N-2.1“) pasiekia didžiausią stiprumą tiek gniuždant, tiek lenkiant.



27 pav. 3D spausdinimo mišinio struktūra su smulkiu užpildu



28 pav. 3D spausdinimo mišinio struktūra su stambiu užpildu

Užpildo frakcija daro įtaką bandinių lenkiamajam ir gniuždomajam stipriui. Naudojant stambesnius užpildus, gaminio gniuždomasis stipris vidutiniškai sumažėja 11 %.

Bandiniai, kurie 2 paras džiuvo krosnelėje, stiprumą gniuždant vidutiniškai pagerino apie 5,12 %, o stiprumą lenkiant – net 37 %.

Iš naudotų užpildų, labiausiai yra tinkamas smulkus užpildas, kurio frakcija yra mažesnė nei 6,3 mm. Nors gaminio džiovinimas ir pagerina mechanines bandinio savybes, tačiau komercinėje veikloje tokios sąlygos nebus sudarytos.

### 3.4.5. Susitraukimų matavimai

Susitraukimai matuoti pagal 3.3.7. skyriuje nurodyta metodiką. Bandymo metu buvo atlikti bandinių susitraukimo bei masės matavimai, kurie pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. Bandinių ilgių ir masių matavimų reikšmės

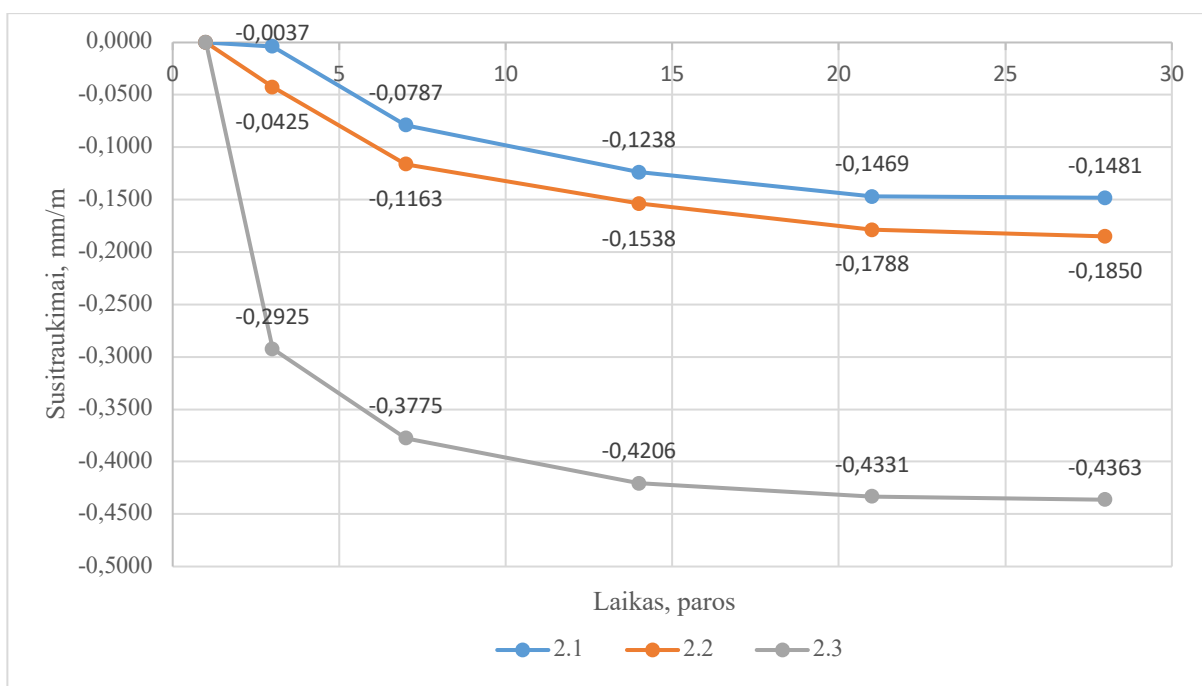
| Bandinio žymuo | 1      |       | 3      |       | 7      |       | 14     |       | 21     |       | 28     |       |
|----------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                | tr, mm | m, g  | tr, mm | m, g  | tr, mm | m, g  | tr, mm | m, g  | tr, mm | m, g  | tr, mm | m, g  |
| 2.1            | 3,17   | 491,3 | 3,16   | 489,8 | 3,05   | 485,1 | 2,98   | 479,5 | 2,94   | 475,7 | 2,94   | 470,5 |
| 2.2            | 1,12   | 359,7 | 1,05   | 355,9 | 0,93   | 348,8 | 0,87   | 342,3 | 0,83   | 338,9 | 0,82   | 332,6 |
| 2.3            | 3,07   | 418,2 | 2,60   | 412,5 | 2,46   | 406,4 | 2,40   | 400,9 | 2,38   | 394,8 | 2,37   | 389,3 |

Išmatavus prizmių susitraukimo bei masės pokyčius, atlikti susitraukimų skaičiavimai, rezultatai pateikti 12 lentelėje.

**12 lentelė.** Susitraukimo rezultatai

| Paros | Sudėties žymuo   |        |        |
|-------|------------------|--------|--------|
|       | 2.1              | 2.2    | 2.3    |
|       | Susitraukimas, % |        |        |
| 1     | 0,0000           | 0,0000 | 0,0000 |
| 3     | 0,0037           | 0,0425 | 0,2925 |
| 7     | 0,0787           | 0,1163 | 0,3775 |
| 14    | 0,1238           | 0,1538 | 0,4206 |
| 21    | 0,1469           | 0,1788 | 0,4331 |
| 28    | 0,1481           | 0,1850 | 0,4363 |

Apskaičiavus susitraukimus, buvo nubraižyta grafinė susitraukimų diagrama, vaizduojanti priklausomybę nuo laiko (žr. 29 pav.).



**29 pav.** Susitraukimų išsidėstymas laike

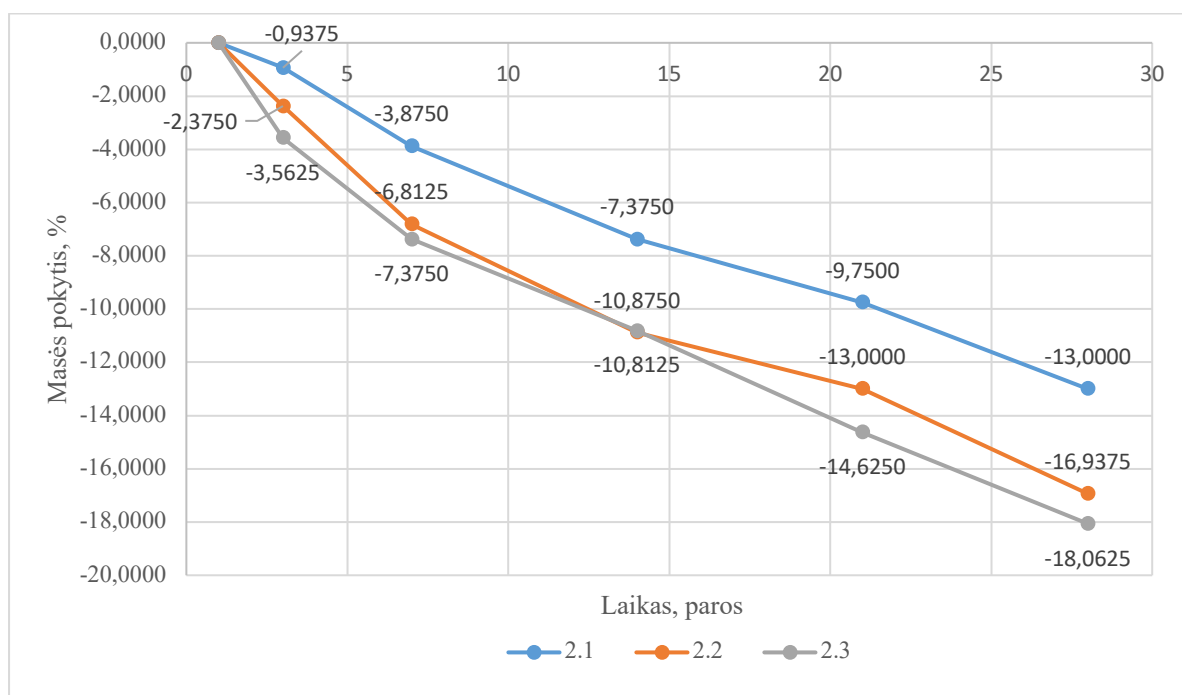
Galima pastebėti, kad bandinio, kurio sudėtyje yra didesnės frakcijos užpildų, susitraukimai yra didžiausi. Tarp tik komercinio 3D spausdinimo mišinio ir 3D spausdinimo mišinio ir mažesnių užpildų didelio skirtumo nėra.

Išanalizavus gautus tyrimų rezultatus, galime teigti, jog susitraukimas priklauso nuo užpildo frakcijos – naudojant mažesnę užpildą, vidutiniškai susitraukimai gali būti sumažinti daugiau nei 50 %.

**13 lentelė. Masės pokyčio rezultatai**

| Paros | Sudėties žymuo   |         |         |
|-------|------------------|---------|---------|
|       | 2.1              | 2.2     | 2.3     |
|       | Masės pokytis, % |         |         |
| 1     | 0,0000           | 0,0000  | 0,0000  |
| 3     | 0,9375           | 2,3750  | 3,5625  |
| 7     | 3,8750           | 6,8125  | 7,3750  |
| 14    | 7,3750           | 10,8750 | 10,8125 |
| 21    | 9,7500           | 13,0000 | 14,6250 |
| 28    | 13,0000          | 16,9375 | 18,0625 |

Apskaičiavus susitraukimus, buvo nubraižyta grafinė masės pokyčio diagrama (žr. 31 pav.).



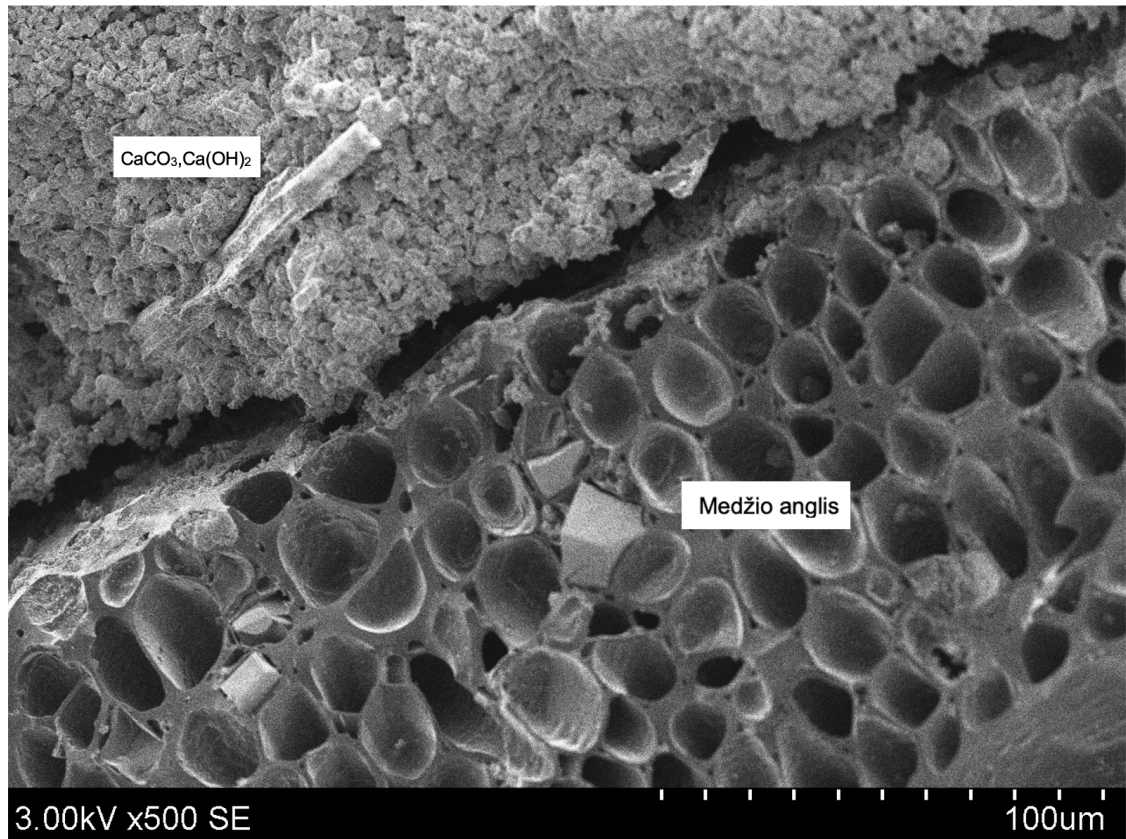
**30pav. Masės pokyčių išsidėstymas**

Analizuojant bandinių masės pokyčius, buvo pastebėta, kad daugiausia masės (7,5 %) prarado 2.1 bandinys. Mažiausiai masės prarado (4,3 %) komercinis 3D spausdinimo mišinys.

### 3.4.6. Mikrostruktūros tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu

Atliekant magistro baigiamąjį darbą, buvo atlikta užpildo Nr. 2 (sudėtis pateikta 1 lentelėje) mikroskopinė analizė.

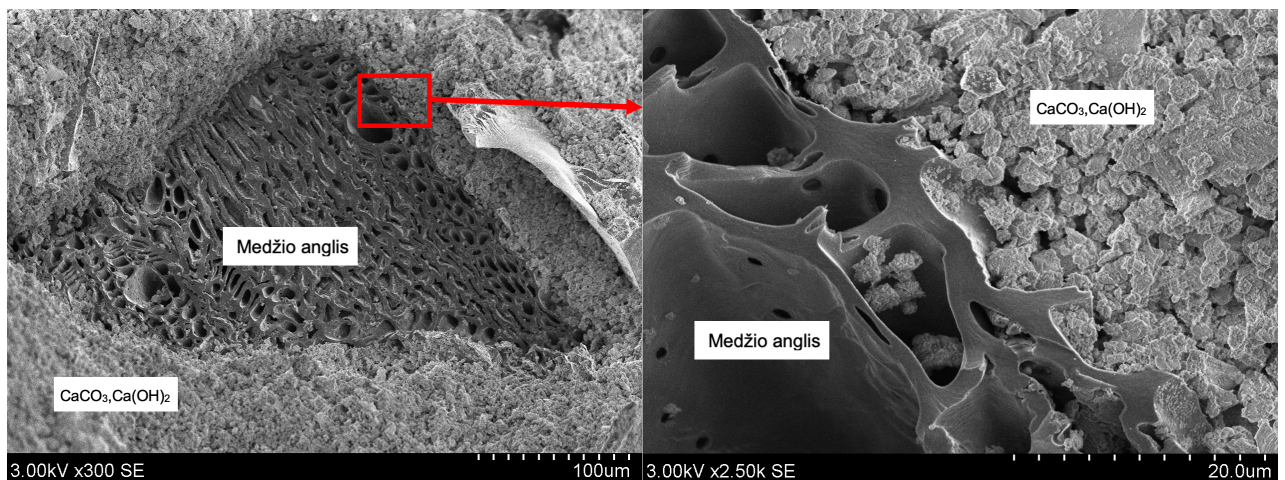
Mikroskopinėse nuotraukose galima pastebėti užpildo, kuris padarytas iš medžio anglies bei gesintų kalkių, struktūrą: medžio anglis turi tamsesnę spalvą, porėtumą, tuo tarpu gesintos kalkės yra šviesesnės spalvos bei neturi tiek kanalų ir porų.



**31 pav.** Užpildo Nr. 2 SEM nuotrauka (padidinta 500 kartų)

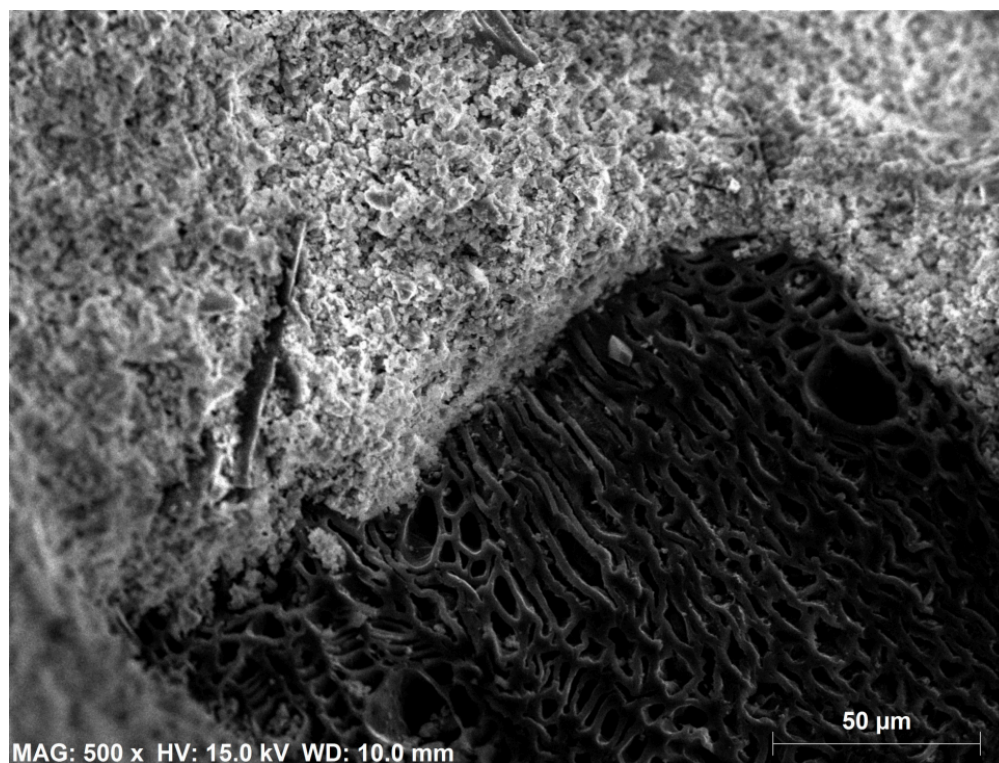
32 paveiksle pastebima linija tarp medžio anglies ir gesintų kalkių, tai tarpas ir reiškia, jog kalkės ir anglis nebuvo sulipusi tarpusavyje. Atsiskyrimas galėjo įvykti ne tik gaminimo procese, o ir skilimo ar užpildų transportavimo metu.

33 paveiksle priešingai nei 32 paveiksle, anglis ir kalkės yra sukibusios gerai – nėra jokio tarpo tarp skirtingų medžiagų, taip pat į medžio anglies poras yra įsiskverbusių gesintų kalkių dalelių.



**32 pav.** Užpildo Nr. 2 SEM nuotrauka

Atliekant mikroskopines nuotraukas, taip pat buvo atlikta spektroskopija (EDS), kurios pagalba buvo nustatyta cheminė užpildo sudėtis. Spektroskopija buvo atlikta naudojant 34 paveikslėlį.



**33 pav.** Užpildo Nr. 2 SEM nuotrauka, kuriai buvo atlikta EDS

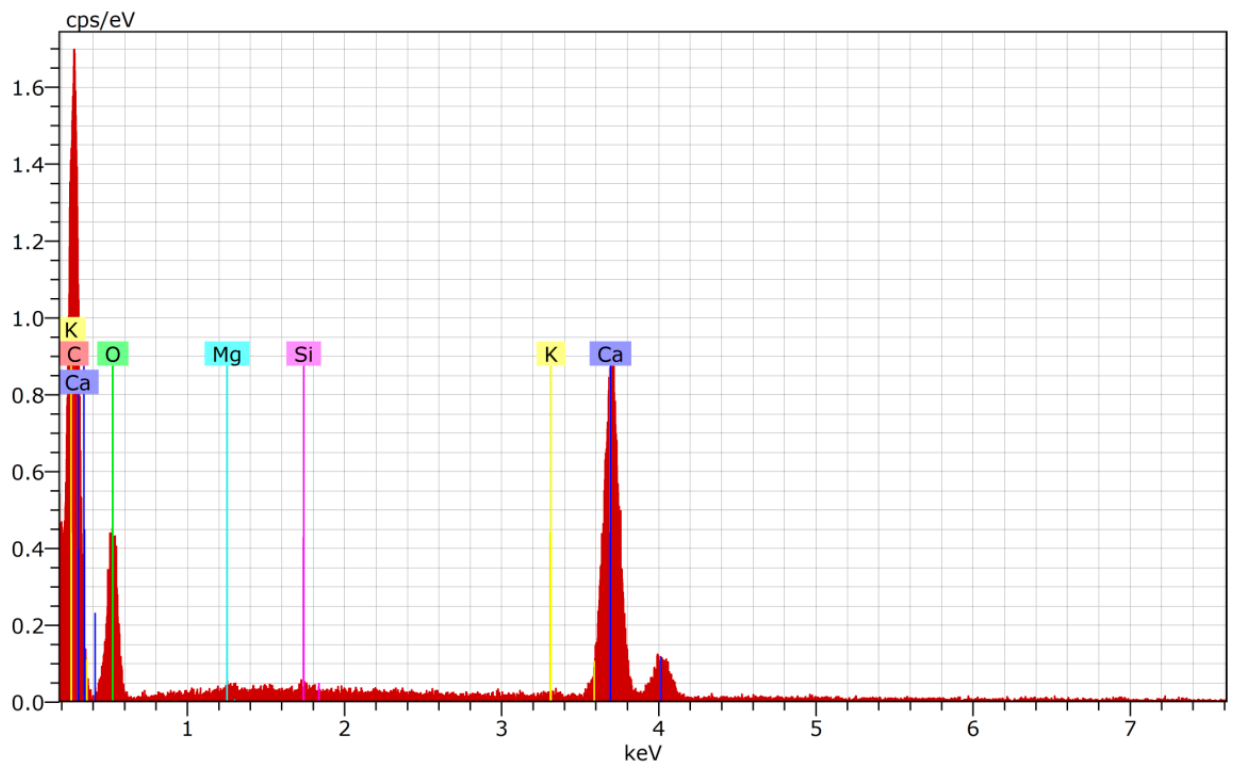
Iš EDS ataskaitos buvo gauta sudėtis (žr. 35 pav.).

Spectrum: Acquisition

| Element   | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error<br>[%] |
|-----------|----------|------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Carbon    | K-series | 22.32            | 20.04             | 31.83             | 7.5          |
| Oxygen    | K-series | 46.56            | 41.81             | 49.85             | 6.7          |
| Calcium   | K-series | 41.49            | 37.25             | 17.73             | 1.3          |
| Silicon   | K-series | 0.34             | 0.30              | 0.20              | 0.0          |
| Magnesium | K-series | 0.36             | 0.32              | 0.25              | 0.1          |
| Potassium | K-series | 0.31             | 0.28              | 0.13              | 0.0          |
| Total:    |          | 111.37           | 100.00            | 100.00            |              |

**34 pav.** Užpildo Nr. 2 EDS ataskaita





**35 pav.** Užpildo Nr. 2 EDS spektras

Iš 35 bei 36 paveikslų matoma, jog sudėtyje yra magnio, silicio, kalio priemaišų, nors sudėtyje šių cheminių elementų nėra. Kadangi šių elementų yra iki 1 % (žr. 35 pav.), galime daryti išvadą, kad priemaišų galėjo atsirasti naudojant bendrą įrangą laboratorijoje: žiauninį smulkintuvą, granuliatorių, menteles ar kibirus, kurie buvo naudojami gaminant lengvuosius užpildus.

#### 4. Išvados

1. Magistro baigiamojo darbo metu buvo pagaminti 6 užpildai, kurie buvo sudaryti iš skirtingų rišamųjų medžiagų (cemento, gesintų kalkių), o pagrindinis organinis komponentas gaminant užpildus buvo medžio anglis arba medžio drožlės, kurios buvo užmerktos su vandeniu arba su aliuminio sulfatu. Geriausius rezultatus parodė užpildas, kurį sudarė medžio anglis, gesintos kalkės bei vanduo. Tolimesniuose eksperimentuose buvo gilinamasis į šio užpildo savybes.
2. Tyrimo metu pastebėta, kad karbonizacija CO<sub>2</sub> dujomis turi didelę įtaką užpildo gniuždymo stipriui. Užpildo Nr. 2, kurį sudarė gesintos kalkės, medžio anglis bei vanduo, stiprumas gniuždant padidėjo net 71 %.
3. Su pagamintais užpildais, buvo gaminami betoniniai bandiniai, kurių tankis svyravo nuo 911 kg/m<sup>3</sup> iki 1745 kg/m<sup>3</sup>, o atsparumas gniuždant nuo 0,19 MPa iki 7,37 MPa. Geriausius rezultatus parodė betoninis bandinys, kurio sudėtyje buvo užpildas Nr. 2 (gesintos kalkės, medžio anglis, vanduo). Tolimesniuose bandymuose bus orientuojamasi į užpildą Nr. 2 ir kaip jo frakciją keičia tiriamas savybes.
4. Prizmės su 3D spausdinimo mišiniu buvo gaminamos su skirtingomis užpildo Nr. 2 (gesintos kalkės, medžio anglis, vanduo) frakcijomis bei be užpildo. Iš rezultatų galima pastebėti, kad didesnio ir mažesnio užpildų stipris gniuždant skyrėsi 11%, o stipriui lenkiant frakcijos dydis įtakos neturi. Verta paminėti, kad geriausius rezultatus parodė prizmė, kuri užpildų neturi.
5. Atlikus užpildo Nr. 2 (gesintos kalkės, medžio anglis, vanduo) mikroskopines nuotraukas, buvo pastebėta, kad vietomis medžio anglis su rišikliu nėra gerai sulipusios, tai galėjo įvykti dėl transportavimo, skilimo metu.

## Literatūros sąrašas

1. OPOKU, A., et al. Sustainable Procurement in Construction and the Realisation of the Sustainable Development Goal (SDG) 12. *Journal of Cleaner Production*. 2022, **376**, 1-14. [žiūrėta 2023-03-17]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134294>. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134294.
2. PATEL, A., SHELAKE, A. and YADHAV, A. Sustainable Construction by using Novel Frameworks using BIM, LEED, and Lean Methods. *Materials Today : Proceedings*. 2023, , 1-10. [žiūrėta 2023-03-14]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.238>. ISSN 2214-7853. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.238.
3. LAZORENKO, G., KASPRZHITSKII, A. and FINI, E.H. Sustainable Construction Via Novel Geopolymer Composites Incorporating Waste Plastic of Different Sizes and Shapes. *Construction & Building Materials*. 2022, **324**, 1-9. [žiūrėta 2023-03-11]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126697>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126697.
4. SATHIPARAN, N., ANBURUVEL, A. and SELVAM, V.V. Utilization of Agro-Waste Groundnut Shell and its Derivatives in Sustainable Construction and Building Materials – A Review. *Journal of Building Engineering*. 2023, **66**, 1-20. [žiūrėta 2023-03-12]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105866>. ISSN 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.105866.
5. INCE, C., TAYANÇLI, S. and DEROGAR, S. Recycling Waste Wood in Cement Mortars Towards the Regeneration of Sustainable Environment. *Construction & Building Materials*. 2021, **299**, 1-16. [žiūrėta 2023-03-10]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123891>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123891.
6. ATTARAN, M. The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing. *Business Horizons*. 2017, **60**(5), 677-688. [žiūrėta 2023-02-20]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>. ISSN 0007-6813. DOI: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.
7. AHMED, G.H. A Review of “3D Concrete Printing”: Materials and Process Characterization, Economic Considerations and Environmental Sustainability. *Journal of Building Engineering*. 2023, **66**, 1-32. [žiūrėta 2023-03-19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223000426>. ISSN 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.105863.
8. KAZEMIAN, A. and KHOSHNEVIS, B. Real-Time Extrusion Quality Monitoring Techniques for Construction 3D Printing. *Construction & Building Materials*. 2021, **303**, 1-11. [žiūrėta 2023-02-17]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124520>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124520.
9. BOGUE, R. 3D Printing: The Dawn of a New Era in Manufacturing?. *Assembly Automation*. 2013, **33**(4), 307-311. [žiūrėta 2023-02-18]. Prieiga per: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/AA-06-2013-055/full/html>. ISSN 0144-5154. DOI: 10.1108/AA-06-2013-055.
10. ROBAYO-SALAZAR, R., MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R., VILLAQUIRÁN-CAICEDO, M.A. and DELVASTO ARJONA, S. 3D Printing with Cementitious Materials: Challenges and

Opportunities for the Construction Sector. *Automation in Construction*. 2023, **146**, 104693. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522005635>. ISSN 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104693.

11. DEY, D., et al. Use of Industrial Waste Materials for 3D Printing of Sustainable Concrete: A Review. *Journal of Cleaner Production*. 2022, **340**, 1-14. [žiūrėta 2023-02-25]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130749>. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130749.

12. KAZEMIAN, A. and KHOSHNEVIS, B. Real-Time Extrusion Quality Monitoring Techniques for Construction 3D Printing. *Construction & Building Materials*. 2021, **303**, 2-11. [žiūrėta 2023-03-18]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124520>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124520.

13. SCHULDT, S.J., JAGODA, J.A., HOISINGTON, A.J. and DELORIT, J.D. A Systematic Review and Analysis of the Viability of 3D-Printed Construction in Remote Environments. *Automation in Construction*. 2021, **125**, 103642. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521000935>. ISSN 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103642.

14. ZAREIYAN, B. and KHOSHNEVIS, B. Interlayer Adhesion and Strength of Structures in Contour Crafting - Effects of Aggregate Size, Extrusion Rate, and Layer Thickness. *Automation in Construction*. 2017, **81**, 112-121. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658051730523X>. ISSN 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.06.013.

15. JO, J.H., JO, B.W., CHO, W. and KIM, J. Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020, **14**(2), 305-315. Prieiga per: <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=&#61;NODE09321568>. ISSN 1976-0485. DOI: 10.1186/s40069-019-0388-2.

16. ALHUMAYANI, H., GOMAA, M., SOEBARTO, V. and JABI, W. Environmental Assessment of Large-Scale 3D Printing in Construction: A Comparative Study between Cob and Concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2020, **270**, 122463. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620325105>. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122463.

17. INAGAKI, M. and KANG, F. *Chapter 1 - Introduction*. INAGAKI, Michio and KANG, Feiyu eds., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014 Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128008584000012> ISBN 9780-128008584. DOI 10.1016/B978-0-12-800858-4.00001-2.

18. INAGAKI, M. and KANG, F. *Materials Science and Engineering of Carbon: Fundamentals (Second Edition)* M. INAGAKI and F. KANG eds., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014 *Chapter 3 - Engineering and Applications of Carbon Materials*, pp. 219-525. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128008584000036> ISBN 9780128008584. DOI 10.1016/B978-0-12-800858-4.00003-6.

19. INAGAKI, M. and KANG, F. *Chapter 2 - Fundamental Science of Carbon Materials*. INAGAKI, Michio and KANG, Feiyu eds., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014 Available from:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128008584000024> ISBN 9780-128008584. DOI 10.1016/B978-0-12-800858-4.00002-4.
20. DÉNES, T. and TĂMAȘ-GAVREA, D. Mechanical Properties of Lime Based Composites. *Procedia Manufacturing*. 2020, **46**, 19-26. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920308751>. ISSN 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.004.
21. TORRES, I., MATIAS, G. and FARIA, P. Natural Hydraulic Lime Mortars - the Effect of Ceramic Residues on Physical and Mechanical Behaviour. *Journal of Building Engineering*. 2020, **32**, 101747. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220333805>. ISSN 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101747.
22. APOSTOLOPOULOU, M., BAKOLAS, A. and KOTSAINAS, M. Mechanical and Physical Performance of Natural Hydraulic Lime Mortars. *Construction and Building Materials*. 2021, **290**, 123272. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821010321>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123272.
23. DELTUVA, J., RUDŽIONIS, Ž, VAITKEVIČIUS, V. and VAIČIUKYNIENĖ, D. *Statybinė Medžiagotyra*. Kaunas: Technologija, 2017. ISBN 978-609-02-1331-5.
24. KAZEMI, M., COURARD, L. and ATTIA, S. Water Permeability, Water Retention Capacity, and Thermal Resistance of Green Roof Layers made with Recycled and Artificial Aggregates. *Building and Environment*. 2023, **227**, 109776. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013232201006X>. ISSN 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109776.
25. LI, Z., et al. Research on the Durability and Sustainability of an Artificial Lightweight Aggregate Concrete made from Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash (MSWIBA). *Construction & Building Materials*. 2023, **365**, 1-18. [žiūrėta 2023-03-20]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129993>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129993.
26. TANG, P. and BROUWERS, H.J.H. The Durability and Environmental Properties of Self-Compacting Concrete Incorporating Cold Bonded Lightweight Aggregates Produced from Combined Industrial Solid Wastes. *Construction and Building Materials*. 2018, **167**, 271-285. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818302605>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.035.
27. LIU, J., et al. The Impact of Cold-Bonded Artificial Lightweight Aggregates Produced by Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash (MSWIBA) Replace Natural Aggregates on the Mechanical, Microscopic and Environmental Properties, Durability of Sustainable Concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2022, **337**, 1-18. [žiūrėta 2023-03-01]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130479>. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130479.
28. WANG, S., et al. Co-Utilization of Quarry Tailings and Fly Ash for Non-Sintered Ultra-Lightweight Aggregates (ULWAs) by Autoclave Technology. *Construction & Building Materials*. 2022, **346**, 1-13. [žiūrėta 2023-03-15]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128482>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128482.

29. LIU, J., et al. Understanding the Interacted Mechanism between Carbonation and Chloride Aerosol Attack in Ordinary Portland Cement Concrete. *Cement and Concrete Research*. 2017, **95**, 217-225. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884616311309>. ISSN 0008-8846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.032.
30. GÜNEYISI, E., et al. Influence of the Artificial Lightweight Aggregate on Fresh Properties and Compressive Strength of the Self-Compacting Mortars. *Construction & Building Materials*. 2016, **116**, 151-158. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.140>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.140.
31. KUMAR, P., PASLA, D. and JOTHI SARAVANAN, T. Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete and its Properties: A Review. *Construction & Building Materials*. 2023, **375**, 1-40. [žiūrėta 2023-03-20]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130861>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130861.
32. KOHNO, K., et al. Effects of Artificial Lightweight Aggregate on Autogenous Shrinkage of Concrete. *Cement and Concrete Research*. 1999, **29**(4), 611-614. [žiūrėta 2023-03-18]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884698002026>. ISSN 0008-8846. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00202-6.
33. YAPHARY, Y.L., et al. Utilization of CO<sub>2</sub> Cured CSW-MSWIBA Cold Bonded Aggregate into Lightweight Concrete Products for Masonry Units. *Construction & Building Materials*. 2021, **276**, 1-10. [žiūrėta 2023-03-17]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122203>. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122203.
34. SHANG, X., et al. Life Cycle Sustainable Assessment of Natural Vs Artificial Lightweight Aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 2022, **367**, 1-14. [žiūrėta 2023-03-19]. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133064>. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133064.
35. UTHAICHOTIRAT, P., et al. Thermal and Sound Properties of Concrete Mixed with High Porous Aggregates from Manufacturing Waste Impregnated with Phase Change Material. *Journal of Building Engineering*. 2020, **29**, 101111. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219300816>. ISSN 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.101111.
36. SHANG, X., et al. Life Cycle Sustainable Assessment of Natural Vs Artificial Lightweight Aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 2022, **367**, 133064. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622026543>. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133064.
37. SIENGCHIN, S. A Review on Lightweight Materials for Defence Applications: Present and Future Developments. *Defence Technology*. 2023, Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914723000557>. ISSN 2214-9147. DOI: 10.1016/j.dt.2023.02.025.
38. DAS, O., et al. Natural and Industrial Wastes for Sustainable and Renewable Polymer Composites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, **158**, 112054. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121013162>. ISSN 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2021.112054.

39. LEE, K.H., LEE, K.G., LEE, Y.S. and WIE, Y.M. Manufacturing and Application of Artificial Lightweight Aggregate from Water Treatment Sludge. *Journal of Cleaner Production*. 2021, **307**, 127260. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621014797>. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127260.
40. AHMAD, T., AHMAD, K. and ALAM, M. Sustainable Management of Water Treatment Sludge through 3‘R’ Concept. *Journal of Cleaner Production*. 2016, **124**, 1-13. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261600250X>. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.073.
41. FRAGA, M.T., et al. *On the Microstructure and CO<sub>2</sub> Reactivity of Tar-impregnated Charcoal for Cokemaking*. Elsevier BV, -12-02, 2023 ISBN 0016-2361. DOI 10.1016/j.fuel.2023.130451.
42. RODRIGUES, T., BARCELLOS, D.C. and BRAGHINI JUNIOR, A. State of the Art on Development and Improvement of Slow Carbonization Kilns for Charcoal Production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023, **176**, 106257. ISSN 0165-2370. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106257.
43. LST EN 13055-1:2016. *Lengvieji užpildai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.
44. LST EN 12390-3:2019. *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris: Lietuvos standartas* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.
45. LST EN 12390-5:2009. *Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris. Lietuvos standartas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
46. LST EN 12390-5:2019. *Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris. Lietuvos standartas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.



# CERTIFICATE

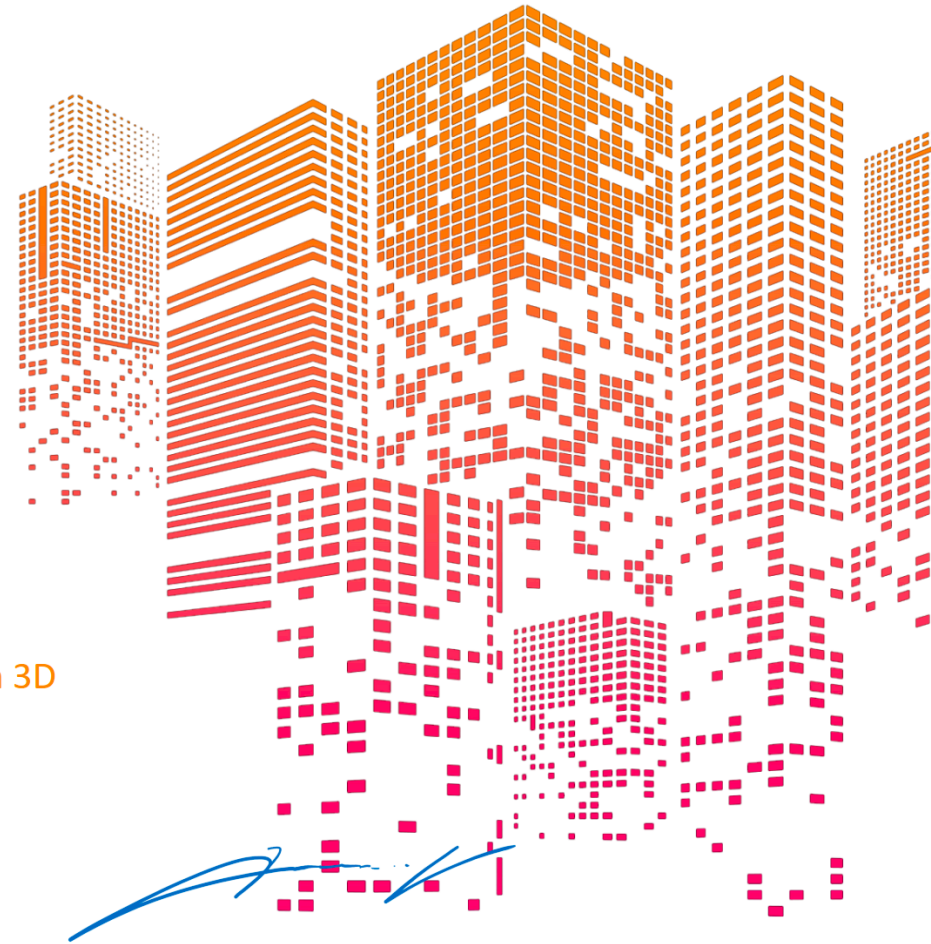
**Fausta Adomaitytė**

Has participated in Student scientific conference  
„SMART BUILT ENVIRONMENT“  
on 24 November 2023

Delivered the presentation:  
**Production and Use of Lightweight Artificial Aggregates in 3D  
Building Technology**

Dean of the Faculty of Civil  
Engineering and Architecture

Prof. Dr. Andrius Jurelionis







# CERTIFICATE

**Fausta Adomaitytė**

**Presentation**

**Production and Use of Lightweight Artificial Aggregates in 3D Building Technology**

Was elected as one of the best during student scientific conference „SMART BUILT ENVIRONMENT“ by scientific committee on 24 November 2023

Dean of the Faculty of Civil Engineering and Architecture

Prof. Dr. Andrius Jurelionis

