



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

**Presuoto biokompozito gamyba naudojant medienos atliekas  
ir jo savybių tyrimai**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Guoda Stankevičienė**

Projekto autorė

**Doc. dr. Algirdas Augonis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Presuoto biokompozito gamyba naudojant medienos atliekas ir jo savybių tyrimai**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Guoda Stankevičienė**

Projekto autorė

**Doc. dr. Algirdas Augonis**

Vadovas

**Doc. dr. Ernestas Ivanauskas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Guoda Stankevičienė

## **Presuoto biokompozito gamyba naudojant medienos atliekas ir jo savybių tyrimai**

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.

Guoda Stankevičienė

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



Stankevičienė, Guoda. Presuoto biokompozito gamyba naudojant medienos atliekas ir jo savybių tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Algirdas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: biokompozitas, medienos drožlės, rišiklis, anglies dioksidas, karbonizacija.

Kaunas, 2023. 45 p.

## **Santrauka**

Magistro baigiamojo projekto tikslas yra pagaminti biokompozitus su medienos drožlėmis ir nustatyti jų fizikines bei mechanines savybes.

Projekto uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinius straipsnius ir tikslingai juos pateikti tematikos sampratoje apie biokompozitams naudojamas medžiagas, gamybos būdus, jų savybes bei pritaikomumą;
2. Pagaminti presuotus biokompozitus su medienos atliekomis ir cemento rišikliu bei ištirti jų fizikines ir mechanines savybes;
3. Pagaminti presuotus biokompozitus su medienos atliekomis ir kalkių rišikliu bei ištirti jų fizikines ir mechanines savybes;
4. Nustatyti medienos drožlių paruošimo įtaką presuoto biokompozito savybėms;
5. Išlaikyti presuotus biokompozitus CO<sub>2</sub> dujomis prisotintoje kameroje ir nustatyti karbonizacijos įtaką presuotų gaminių savybėms

Literatūros analizėje aprašyta biokompozito sandara, užpildų bei rišiklių įvairovė. Išanalizuota atliktų tyrimų biokompozitų medžiagų gausa, sudėčių įvairovė, gamybos būdai, fizikinės bei mechaninės savybės, ilgalaikiškumas bei trūkumai. Taip pat analizėje pateikiamas biokompozitų pritaikymas statyboje.

Antrame skyriuje pateikiamos atskiros biokompozitų su cemento ir su kalkių rišikliu sudėtys bei jų gamybos technologija. Skyriuje analizuojamos ir išskiriamos geriausios su cemento bei su kalkių rišikliu sudėtys. Taip pat aprašomi bandymų metodai, naudoti prietaisai bei bandymų eigos.

Trečiame skyriuje analizuojami eksperimentų rezultatai. Pateikiami pjuvenų paruošimo būdai bei pH vertės, analizuojama karbonizacijos įtaka bandinių savybėms bei jos gylis, taip pat įvertinta vandens įgeriamumo įtaka biokompozitų savybėms. Atliekant bandymus, nustatyta, kad tiek bandinių su cementu tiek su kalkėmis tankių bei gniuždomojo stiprumo vertės priklauso nuo rišiklio bei pjuvenų kiekio bandiniuose, pjuvenų paruošimo būdo ir dydžio, taip pat nuo karbonizacijos. Išsiaiškinta, kad bandiniais su kalkėmis utilizuoja didesnę CO<sub>2</sub> dujų kiekį nei bandiniai su cementu.

Magistro baigiamajame projekte yra 13 lentelių, 30 paveikslų. Darbe panaudoti 43 literatūros šaltiniai.

Stankevičienė Guoda. Research of Produced and Pressed Biocomposite with Wood Waste and its Properties. Master's Final Degree Project / supervisor Doc. Algirdas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: biocomposite, wood chips, binder, carbon dioxide, carbonation.

Kaunas, 2023. 45 pages.

### **Summary**

The aim of the Master's thesis project is to produce biocomposites with wood chips and determine their physical and mechanical properties.

Project objectives:

1. To analyse scientific articles and to present them in a targeted way in the conception of the topic on materials used for biocomposites, production methods, their properties and applicability;
2. To produce compressed biocomposites with wood waste and cement binder and to investigate their physical and mechanical properties;
3. To produce compressed biocomposites with wood waste and lime binder and investigate their physical and mechanical properties;
4. Determine the effect of wood chip preparation on the properties of the pressed biocomposite;
5. To maintain the compressed biocomposites in a CO<sub>2</sub> gas saturated chamber and to determine the effect of carbonisation on the properties of the pressed products.

The literature review describes the structure of the biocomposite and the variety of fillers and binders. The variety of biocomposite materials, compositions, production methods, physical and mechanical properties, durability and drawbacks of biocomposites have been analysed. The analysis also presents the applications of biocomposites in construction.

Chapter 2 presents the individual compositions of the biocomposites with cementitious and lime binder and the technology for their production. The chapter analyses and identifies the best cement and lime binder formulations. It also describes the test methods, the instruments used and the test procedures.

Chapter 3 analyses the results of the experiments. The sawdust preparation methods and pH values are presented, the influence of carbonisation on the properties of the samples and the depth of carbonisation are analysed, and the influence of water absorption on the properties of the biocomposites is assessed. The tests showed that the densities and compressive strengths of both cement and lime samples depend on the binder and sawdust content of the samples, the method and size of the sawdust preparation, and the amount of carbonation. It was found that the lime specimens can absorb more CO<sub>2</sub> gas than the cement specimens.

Master's thesis consists of 13 tables, 30 figures and 43 references.

## Turinys

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Lentelių sąrašas.....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>Paveikslų sąrašas.....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>Įvadas .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>1. Literatūros apžvalga .....</b>  | <b>11</b> |
| 1.1. Biokompozitų rūšys .....   | 11        |
| 1.2. Biokompozito mechaninės ir fizikinės savybės.....                                  | 14        |
| 1.3. Biokompozito gamybos technologija.....   | 16        |
| 1.4. Biokompozito panaudojimas statyboje .....  | 19        |
| <b>2. Sudėtis ir tyrimų metodologija .....</b>  | <b>21</b> |
| 2.1. Biokompozito sudėtis ir gamyba .....   | 21        |
| 2.2. Tyrimų metodologija.....   | 23        |
| <b>3. Tyrimo rezultatai ir analizė .....</b>  | <b>28</b> |
| 3.1. Mirkytų medienos pjuvenų pH vertės bei paruošimo įtaka biokompozito savybėms ..... | 28        |
| 3.2. Kietinimo CO <sub>2</sub> kameroje įtaka bandinių savybėms .....                   | 28        |
| 3.3. Karbonizacijos gylis.....  | 28        |
| 3.4. Biokompozitų vandens įgeriamumas .....   | 32        |
| 3.5. Bandinių tankiai .....   | 34        |
| 3.6. Bandinių gniuždymo stipris.....  | 37        |
| <b>Išvados .....</b>  | <b>41</b> |
| <b>Literatūros sąrašas.....</b>   | <b>42</b> |

## Lentelių sąrašas

|   |    |
|---|----|
| <b>1 lentelė.</b> Darbe analizuojami užpildai, naudoti biokompozitų gamybai .....               | 12 |
| <b>2 lentelė.</b> Biokompozitų sudėtys naudojant cementą .....                                  | 21 |
| <b>3 lentelė.</b> Biokompozitų sudėtys naudojant kalkes .....                                   | 22 |
| <b>4 lentelė.</b> Bandinių su cementu karbonizacijos gylio matavimo rezultatai .....            | 28 |
| <b>5 lentelė.</b> Bandinių su kalkėmis karbonizacijos gylio matavimo rezultatai.....            | 30 |
| <b>6 lentelė.</b> Bandinių prieš vandens įgeriamumo bandymą tankių rezultatai .....             | 32 |
| <b>7 lentelė.</b> Bandinių po vandens įgeriamumo bandymo tankių rezultatai.....                 | 33 |
| <b>8 lentelė.</b> Bandinių prieš vandens įgeriamumo bandymą gniuždomųjų stiprių rezultatai..... | 33 |
| <b>9 lentelė.</b> Bandinių po vandens įgeriamumo bandymo gniuždomųjų stiprių rezultatai .....   | 33 |
| <b>10 lentelė.</b> Bandinių su cemento rišikliu tankiai .....                                   | 34 |
| <b>11 lentelė.</b> Bandinių su kalkių rišikliu tankiai.....                                     | 36 |
| <b>12 lentelė.</b> Bandinių su cemento rišikliu gniuždomieji stipriai.....                      | 37 |
| <b>13 lentelė.</b> Biokompozito bandinių su kalkių rišikliu gniuždomieji stipriai.....          | 39 |



## Paveikslų sąrašas

|  |    |
|--|----|
| <b>1 pav.</b> Biokompozito sudėtis [7] .....   | 11 |
| <b>2 pav.</b> Užpildų klasifikacija [7].....   | 12 |
| <b>3 pav.</b> Rišiklių klasifikacija [7].....  | 12 |
| <b>4 pav.</b> Kanapių pluoštas (kairėje) ir spalvai (dešinėje) [4].....  | 13 |
| <b>5 pav.</b> Laukinis augalas (Diss) [3].....   | 13 |
| <b>6 pav.</b> Kukurūzų stiebai, paruošti gamybai [2].....  | 13 |
| <b>7 pav.</b> Kanapių biokompozito šilumos laidumo priklausomybė nuo tankio [4].....   | 16 |
| <b>8 pav.</b> Kukurūzų stiebų užpildo su portlandcemenčio (kairėje) bei magnio fosfato cemento (dešinėje) rišiklių biokompozito gaminiai [2] ..... | 17 |
| <b>9 pav.</b> Medienos biokompozito medžiagos,— a) bioanglis, b) medienos drožlės [5] .....  | 17 |
| <b>10 pav.</b> Medžio biokompozito gaminiai esant skirtingam bioanglies kiekiui [5].....   | 18 |
| <b>11 pav.</b> Kanapių biokompozito gamybai naudota stačiakampio gretasienio( dešinėje) ir cilindro (kairėje) formos [4].....                      | 18 |
| <b>12 pav.</b> Sukurtas fasadas iš biokompozitinių plokščių [31] .....   | 19 |
| <b>13 pav.</b> Arbolito blokelis [23].....   | 20 |
| <b>14 pav.</b> Durisolio blokelis [24] .....   | 20 |
| <b>15 pav.</b> Pamerktos pjuvenos: kairėje tik su vandeniu, viduryje su $\text{Ca(OH)}_2$ milteliais, dešinėje su $\text{CaCl}_2$ granulėmis ..... | 23 |
| <b>16 pav.</b> Masės maišymo prietaisas „AUTOMIX“.....   | 24 |
| <b>17 pav.</b> Bandinių presavimo įrenginys gyраторius.....  | 24 |
| <b>18 pav.</b> Bandinių kietinimo sąlygos $\text{CO}_2$ kameroje .....   | 25 |
| <b>19 pav.</b> Bandinių kietinimo ore sąlygos .....  | 25 |
| <b>20 pav.</b> Gniuždymo bandymui naudoti presai „Toni Technik“ .....  | 26 |
| <b>21 pav.</b> Ant perskelto bandinio užpurkštas fenolfaleino indikatorius ir išmatuotas karbonizacijos gylis.....                                 | 26 |
| <b>22 pav.</b> pH vertės nustatymas su matuokliu .....   | 27 |
| <b>23 pav.</b> Biokompozitų vandens įgeriamumo bandymas.....   | 27 |
| <b>24 pav.</b> Bandiniai po vandens įgeriamumo bandymo .....   | 32 |
| <b>25 pav.</b> Bandinių tankiai prieš ir po vandens įgeriamumo bandymo .....   | 34 |
| <b>26 pav.</b> Bandinių gniuždomieji stipriai prieš ir po vandens įgeriamumo bandymo.....  | 34 |
| <b>27 pav.</b> Biokompozito bandinių su cementu tankiai .....  | 36 |
| <b>28 pav.</b> Biokompozito bandinių su kalkėmis tankiai .....   | 37 |
| <b>29 pav.</b> Biokompozito bandinių su cementu gniuždomieji stipriai.....   | 38 |
| <b>30 pav.</b> Biokompozito bandinių su kalkėmis gniuždomieji stipriai .....   | 40 |

## Ivadas

Magistro baigiamojo projekto tikslas – pagaminti biokompozitus su medienos drožlėmis ir nustatyti jų fizikines bei mechanines savybes.

Projekto uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinius straipsnius ir tikslingai juos pateikti tematikos sampratoje apie biokompozitams naudojamas medžiagas, gamybos būdus, jų savybes bei pritaikomumą;
2. Pagaminti presuotus biokompozitus su medienos atliekomis ir cemento rišikliu bei ištirti jų fizikines ir mechanines savybes;
3. Pagaminti presuotus biokompozitus su medienos atliekomis ir kalkių rišikliu bei ištirti jų fizikines ir mechanines savybes;
4. Nustatyti medienos drožlių paruošimo įtaką presuoto biokompozito savybėms;
5. Išlaikyti presuotus biokompozitus CO<sub>2</sub> dujomis prisotintoje kameroje ir nustatyti karbonizacijos įtaką presuotų gaminių savybėms.

Mokslinių tyrimų naujumas

Pastaruoju metu ekologiškumas ir ekonomika vieni iš svarbiausių tyrinėjimo aspektų. Biokompozitai yra medžiaga, kurioje gali būti naudojamos organinės atliekos ir gamybos metu išskiriamas mažas anglies dioksido kiekis, tačiau apie juos atliktų tyrimų skaičius yra labai mažas. Dėl šios priežasties nagrinėjant biokompozitus stengiamasi gamybai panaudoti kuo daugiau organikos bei nustatyti karbonizacijos įtaką jų mechaninėms ir fizikinėms savybėms.

Praktinis pritaikomumas

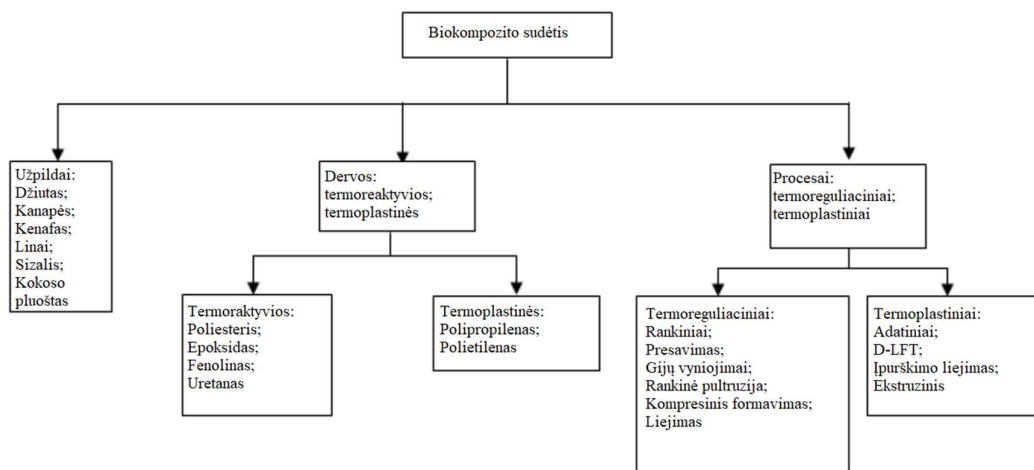
Projekte atliekami biokompozito su medienos atliekomis fizikinių bei mechaninių savybių tyrimai. Taip pat tiriamas karbonizacijos poveikis biokompozito savybėms ir organikos naudojimas gamybai. Svarbus aspektas, kad gaminant biokompozitus mažinamas anglies dioksido kiekis. Gauti tyrimo rezultatai rodo, kad pagaminti biokompozitai gali būti kaip termoizoliacinė medžiaga ar konstrukcijos termoizoliacinė dalis.

## 2. Literatūros apžvalga

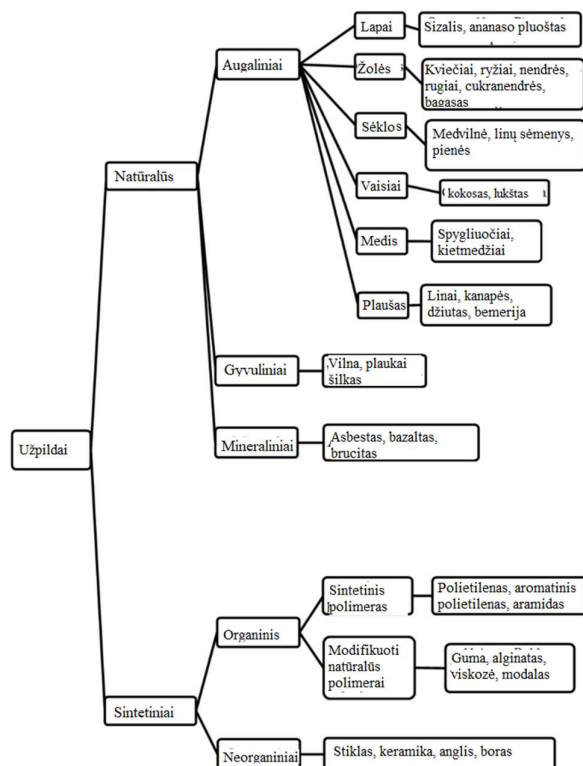
Per pastaruosius kelis dešimtmečius spartus ekonomikos augimas visame pasaulyje padidino energijos suvartojimo kiekį ir aplinkos taršą [1]. Dėl šios priežasties statybos sektoriuje pradėta ieškoti alternatyvų, kuo pakeisti įprastas medžiagas. Vienas iš būdų, naudoti žaliąsias ir geras šilumos savybes turinčias statybines medžiagas, biokompozitus [8]. Celiuliozės užpildu sustiprintos poliolefino kompozitinės medžiagos (biokompozitai), termiškai formuojami medienos ar plastiko kompozitai, gali prisidėti prie tvoros visuomenės kūrimo [11,12]. Taip pat biokompozitus norima naudoti kaip statybinę medžiagą dėl anglies dioksido (CO<sub>2</sub>), kuris išskiriamas gaminant įprastai naudojamas statybines medžiagas. Per 2021 metus visame pasaulyje išskirta 36,3 milijardo tonų anglies dioksido [6].

### 2.1. Biokompozitų rūšys

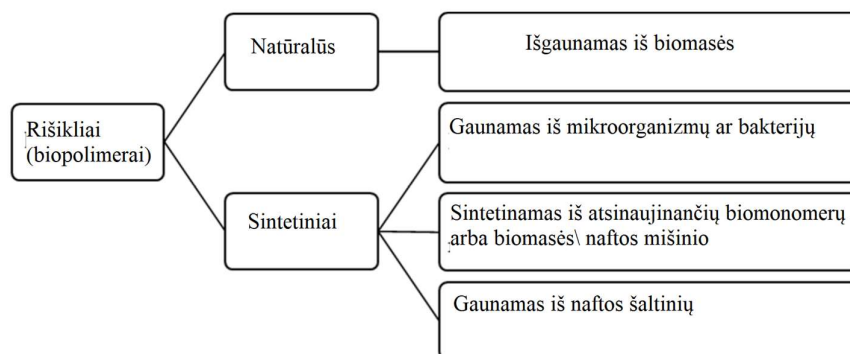
Biokompozitai gaminami iš užpildų, rišiklių ir priedų. Biokompozito sudėtis ir gamybos schema pateikiama paveikslėlyje (žr. 1 pav.). Rišikliai gali būti įvairūs: kalkės, gipsas, portlandcementis, magnio fosfato cementas, augalinės kilmės medžiagos. Užpildai gali būti natūralūs arba sintetiniai. Užpildų ir rišiklių įvairovė, naudojama biokompozituose, pateikiama schemose (žr. 2 ir 3 pav).



1 pav. Biokompozito sudėtis [7]



2 pav. Užpildų klasifikacija [7]



3 pav. Rišiklių klasifikacija [7]

Geopolimeriniai rišikliai gali išskleisti maždaug 80% mažiau anglies dvideginio, lyginant su įprastu portlandcemenčiu (OPC) [34].

Daugelis mokslininkų susidomėjo natūralių medžiagų tyrimu, ypač jų šilumą izoliuojančiomis savybėmis. Populiariausios tirtos medžiagos tai džiuatas, kukurūzų stiebai, šienas, cukranendrės, medžio ir akmens vata, biri celiuliozė, linai, šiaudų ryšuliai, kokosas ir kanapės [4]. Šiame darbe analizuojami biokompozitai gaminami naudojant natūralias medžiagas (žr. 1 lentelę).

**1 lentelė.** Darbe analizuojami užpildai, naudoti biokompozitų gamybai

| Eil. Nr. | Analizuojamų biokompozitų užpildų rūšys |
|----------|---|
| 1.       | Medienos drožlės                        |

|    |  |
|----|--|
| 2. | Kanapių pluoštas ar spaliai (žr. 4 pav.)                               |
| 3. | Laukinių augalų pluoštai (lignoceliulinės granulės, Diss) (žr. 5 pav.) |
| 4. | Kukurūzų stiebai (žr. 6 pav.)  |



**4 pav.** Kanapių pluoštas (kairėje) ir spaliai (dešinėje) [4]



**5 pav.** Laukinis augalas (Diss) [3]



**6 pav.** Kukurūzų stiebai, paruošti gamybai [2]

Darbe analizuojama kukurūzų stiebų [2], kanapių [4], medžio drožlių [5], laukinio augalo (Diss) [3] užpildo įtaka biokompozito gamybai. Taip pat nagrinėjami atlikti fizikiniai bei mechaniniai tyrimai, gamybos įvairovė bei kiti tyrimai aprašyti moksliniuose šaltiniuose.

Autoriai Lu ir kt. [13] tyrė kukurūzų stiebo pluošto kiekio įtaką biomasės plytų savybėms. Jarabo ir kt. [14] patvirtino didelį kukurūzų stiebo, kaip pluošto šaltinio, potencialą gaminant pluoštinį cementą, galintį patenkinti sudėtingų pritaikymų reikalavimus. Ahmad'as ir kt. [15, 16] ištyrė skirtingų dydžių kukurūzų stiebo mikrostruktūrą ir higroscopines savybes.

Arnaud'as ir Gourlay [17] tyrė parametrus, turinčius įtakos kanapių kompozito mechaninėms savybėms. Autoriai Gupta'sas ir kt. [18] išbandė kanapių smulkiąsias atliekas (miltelius) kaip funkcinį dervų priedą biokompozitams gaminti. Autoriai Pretot'as ir kt. [37] tyrė kanapių betono gyvavimo ciklo parametrus.

Augalas (Diss) yra lignoląstelinė medžiaga, autoriai Averous'as ir Digabel'as [19] atliko tyrimą apie lignoceliuliozės užpildų biokompozitų šiluminės ir mechaninės savybės.

Autoriai Li ir kt. [20] skyrė dėmesį eksperimentinei ir skaitinei medienos ir betono plokščių lankstumo analizei, siekiant nustatyti jų mechaninį elgesį. Autoriai Khedmati'as ir kt. [21] atliko tarpfazės tarp perdirbtų užpildų ir cementinių rišamųjų medžiagų tyrimą naudojant integruotą mikrostruktūrinį-nanomechaninį-cheminį apibūdinimą.

## **2.2. Biokompozito mechaninės ir fizikinės savybės**

Kaip ir kiekviena medžiaga, įvairių rūšių biokompozitai išsiskiria savitomis mechaninėmis ir fizikinėmis savybėmis. Daugiausiai yra išskiriamas tankis, poringumas, vandens absorbcija, gniuždomasis ir lenkiamasis stiprumai bei šiluminės savybės.

### Tankis

Pagal Wei ir kt. [2] kukurūzų stiebų biokompozito tankis yra nuo 784 iki 947 kg/m<sup>3</sup>.

Pasak autorių Sellami ir kt. [3] laukinio augalo (Diss) tankis yra 50,3 kg/m<sup>3</sup>. Pastebėta, jog užpildo tankis priklauso nuo pluošto tipo ir pluošto apdoravimo (virtas ar ne), taip pat ar pluoštas plautas, ar ne.

Medienos biokompozito tankis, anot Jeon'o ir kt. [5], priklauso nuo rišklio kiekio ir svyruoja nuo 620 kg/m<sup>3</sup> iki 670 kg/m<sup>3</sup>.

Pagal autorius Benfratello ir kt. [4], kanapių biokompozito tankis, esant stačiakampiems ir cilindriniams bandiniams, svyruoja nuo 300 kg/m<sup>3</sup> iki 700 kg/m<sup>3</sup>.

Alengaram'as ir kt. [35] nustatė, kad tankis priklauso nuo įvairių veiksnių, tokių kaip savitasis tankis, W/C santykis, smėlio rūšys ir jo kiekis, pakeičiamų atliekų kiekis, vandens sugėrimas ir kt.

### Poringumas

Poringumas – svarbi fizinė savybė, galinti turėti įtakos vandens absorbcijai ir šiluminėms savybėms. Yra išskiriami trijų tipų poringumai: atvirasis, uždasis ir bendrasis. Atliekant biokompozito atvirojo poringumo tyrimą tam tikromis sąlygomis (temperatūra, panardinimas į vandenį) gaunamas mažas poringumo rezultatas, nes porose gali būti neišnaudoto oro. Bendruoju poringumo tyrimu gaunami tikslesni rezultatai, nes jis atliekamas tankio būsenų santykio skaičiavimu. Tirdami medžio biokompozito bandinius autoriai Jeon'as ir kt. [5] nustatė, jog anglies porų dydis bandiniuose yra maždaug nuo 5 iki 10 μm.

Autoriai Bourdot'as ir kt. [38] nustatė, kad kanapių spalių poringumas kinta priklausomai nuo dalelių frakcijos ir jis svyruoja tarp 89.3–91.3%.

### Vandens absorbcija

Vanduo medžiagoje daro įtaką jos eksploatacinių savybių pablogėjimui ir nepakankamam ilgalaikiškumui. Todėl absorbcija medžiagoje yra labai svarbi jos savybė. Biokompozito vandens įgėriui įtakos turi ne tik poringumas, bet ir rišiklis. Kanapinio betono vandens sugerties koeficientas – 3,4, kai tuo tarpu kukurūzų stiebo – 9,8 ar 6,2 (priklausomai nuo rišiklio), rodo, kad skirtingas užpildas ir su juo sąveikaujantis rišiklis turi didelę įtaką medžiagos absorbcijai [2].

Pasak autorių Sellami ir kt. [3], pluošto absorbcijos procesas nedaro įtakos kompozitų mechaniniam stiprumui, jeigu yra tinkamas vandens ir cemento santykis.

Anot Jeon'o ir kt. [5], medienos biokompozito vandens kiekis mažėja didėjant anglies kiekiui, taip pat vandens kiekis priklauso nuo poringumo, kuo poringumas didesnis, tuo vandens kiekis mažesnis. Žinoma, kad vandens kiekis bandiniuose svyruoja nuo 6,10 % iki 6,92 %. Taip pat nustatyta, kad dėl spygliuočių medienos komponentų santykio sugerama daugiau vandens, kai susidaro kapiliarinė kondensacija esant aukštai santykinėi drėgmei.

Augalų absorbcijos ir desorbcijos sukelia tam tikrus augalinių pluoštų tūrinius pokyčius kietėjimo laikotarpiu [10].

Žinoma, kad esant dideliame vandens ir cemento santykiui W/C 0,55-0,75, betono su perdirbtomis užpildais stiprumas yra panašus į įprasto betono stiprumą, esant 75–100% pakeitimui. Tačiau sumažinus W/C santykį iki 0,4 pastebėtas tik 25% stiprumo sumažėjimas lyginant su etaloniniu mišiniu [34].

#### Gniuždomasis ir lenkiamasis stiprumai

Tirdami (Diss) betono suspaudimą ir lenkimą, autoriai Sellami ir kt. [3] pastebėjo, jog po 28 dienų virti arba sėmenų aliejumi dengti prizminiai bandiniai 4x4x16 cm įgavo gniuždymo ir lenkimo stiprio santykį nuo 1,29 iki 2,85, kai tuo tarpu įprastų skiedinių santykis kiek daugiau nei 10. Iš to galima spręsti, jog (Diss) kompozito savybės lenkimo atžvilgiu yra pakankamai geros.

Taip pat tirdami skirtingų rišiklių bandinius, autoriai Wei ir kt. [2] išsiaiškino, jog rišant portlandcemenčiu bandinio stipris po 28 parų yra tik 1,5 MPa, o magnio fosfato cemento rišikliu yra 3,82 MPa, tam įtakos galėjo turėti pačio rišiklio stiprumas ir sukibimas su užpildu.

Atlikę gniuždymo bandymą Benfratello ir kt. [4] nustatė, kad apytiksliai 100 mm aukščio bandiniai, priklausomai nuo kanapių spalių kiekio, įgyja stiprumą nuo 0,044 N/mm<sup>2</sup> iki 0,462 N/mm<sup>2</sup>. Stiprumas didėja mažėjant spalių kiekiui. Taip pat autoriai nustatė ir lenkimo bandymo rezultatus, kurie svyruoja nuo 0,080 N/mm<sup>2</sup> iki 0,141 N/mm<sup>2</sup>. Tam įtakos turi tiek spalių kiekis bandinyje, tiek defektai jo pagaminimo metu.

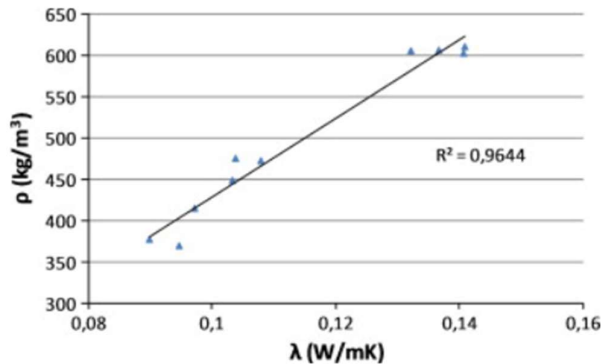
Pagaminę ir išbandę medienos biokompozito bandinius, autoriai Jeon'as ir kt. [5] nustatė, kad lenkimo stipris kinta nuo 7,67 MPa iki 13,19 MPa. Tam įtakos turi bioanglies kiekis, kuo jis didesnis, tuo stiprumas mažesnis.

Atlikti tyrimai rodo, kad kanapių užpildų biokompozitų gniuždymo stipris yra mažesnis nei 1 MPa [9].

#### Šiluminės savybės

Kiekvienos rūšies biokompozitas išsiskiria savitomis šiluminėmis savybėmis. Anot Wei ir kt. [2], bandinių šilumos savybės priklauso nuo temperatūros, atitinkamai sausomis ir drėgnomis sąlygomis. Autoriai ištyrė, jog kukurūzų stiebų biokompozito šilumos laidumas didėja beveik tiesiškai didėjant temperatūrai sausomis ir drėgnomis sąlygomis. Prusty ir kt. [36] nustatė, kad kukurūzų užpildo kompozitas gali įgyti  $1,99 \text{ W/m}^2$  šilumos perdavimo koeficientą.

Autoriai Benfratello ir kt. [4] ištyrė, kad kuo didesnis spalijų kiekis kanapių biokompozite, t. y., mažesnis tankis, tuo labiau mažėja šilumos laidumas (žr. 7 pav.). Šilumos laidumas priklausomai nuo tankio bandiniuose svyruoja nuo  $0,0899 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  iki  $0,1408 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .



7 pav. Kanapių biokompozito šilumos laidumo priklausomybė nuo tankio [4]

Medienos biokompozito šilumos laidumas, pasak Jeon'o ir kt. [5], linkęs mažėti didėjant anglies kiekiui. Nustatyta, kad šilumos laidumas kinta nuo  $0,09301 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  iki  $0,10108 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

Autoriai Kim'as ir kt. [27] parodė, kad natūralaus pluošto kompozitai turi didesnę energijos sugerties greitį veikiant smūgio apkrovoms nei stiklu sustiprinti kompozitai. Šie pasiekimai ir puikus aplinkosauginis veiksmingumas yra svarbūs veiksniai, skatinantys artimiausioje ateityje vis didesnę dėmesį skirti natūralaus pluošto kompozitų naudojimui, todėl šios medžiagos yra patrauklios pramonės įmonėms. Nepaisant visų šių privalumų, kai kurios savybės vis dar neleidžia plačiai naudoti šių medžiagų. Vienos iš jų: stiprumo prognozė konstrukcinės apkrovos metu, neapibrėžtumas dėl ilgalaikio veikimo, drėgmės sugėrimas, mažesnis atsparumas ugniai, mažesnės mechaninės savybės ir ilgaamžiškumas, ribotas apdorojimas, temperatūros, didesnė sąnaudų ir savybių sklaida nei sintetinių kompozitų ir tam tikri sunkumai naudojant gerai žinomus gamybos procesus [28].

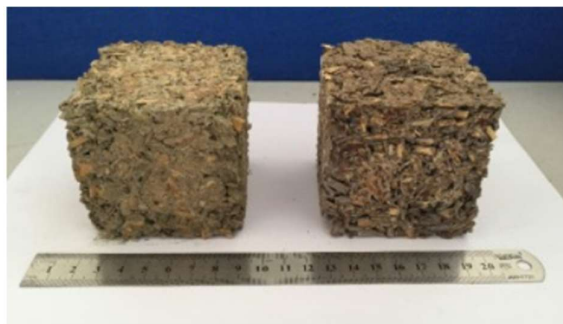
### 2.3. Biokompozito gamybos technologija

Biokompozitai gali būti gaminami naudojant kelias technologijas. Norint pagaminti gerą kompozitą reikia tinkamai parinkti mišinio sudėtį. Taip pat yra svarbus maišymo etapas, kurio metu reikia pasirinkti kiek laiko ir kokia tvarka maišyti medžiagas. Turint mišinį, pagal pasirinktą gamybos procesą, gaminami bandiniai ir po kietėjimo etapo atliekami tyrimai.

Autoriai Wei ir kt. [2] gamindami kukurūzų stiebų biokompozitą naudojo smulkintus atitinkamos frakcijos kukurūzų stiebus (žr. 6 pav.), juos sumaišė su skirtingais užpildais išlaikydami 3:1 santykį. Skirtingo rišiklio bandiniui naudojo skirtingą vandens ir bendros masės santykį, 0,16 esant portlandcemenčio rišikliui ir 0,45 esant magnio fosfato cemento rišikliui. Taip pat pasirinko tinkamą maišymo būdą: pirmiausia mažu greičiu 1 minutę maišė rišiklį, tada supylė reikiamą vandens kiekį ir maišė dar 1 minutę, į mišinį subėrė kukurūzų stiebus ir maišė dideliu greičiu apytiksliai 2 minutes.



Visą mišinį dideliu greičiu supylė į tinkamas formas ir ant vibracinio stalo laikė 45 sekundes. Formas išardė po 1 valandos esant portlandcemenčio rišikliui ir po 4 dienų esant magnio fosfato cemento rišikliui. Gautus bandinius (žr. 8 pav.) po išardymo kietino ore 28 dienas ir atliko tyrimus.



**8 pav.** Kukurūzų stiebų užpildo su portlandcemenčio (kairėje) bei magnio fosfato cemento (dešinėje) rišiklių biokompozito gaminiai [2]

Autoriai Jeon'o ir kt. [5] gamindami medienos biokompozitą pirmiausia susmulkino medžio drožles, jas išsijojo ir atrinko dydį pagal vietos galiojantį standartą. Drožlių medienai pasirinko eglę, jos pirolizę atliko 600 °C temperatūroje ir trumpiau nei 10 min. Taip pat naudojo kljus, karbamido aldehido dervos miltelių forma, bioanglį ir vandeninį tirpalą 25 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Paruoštas medžiagas (žr. 9 pav.) skirstė masės procentinėmis dalimis, padidinę bioanglies ir bendros masės santykį 2 % – nuo 0 % masės iki 10 % masės. Klijų kiekis 15 % bioanglies ir medienos masės, o kietiklis 3 % nuo klijų masės. Gamybos metu terminio slėgio temperatūra yra 200 °C, karšto slėgio laikas – 10 s vienam milimetrui biokompozito storio, esant 0,7 g/cm<sup>3</sup> tiksliniam tankiui. Naudojant tokį gamybos procesą buvo pagaminti 10 mm storio, 20 cm pločio ir ilgio bandiniai (žr. 10 pav.).



**9 pav.** Medienos biokompozito medžiagos,–: a) bioanglis, b) medienos drožlės [5]



**10 pav.** Medžio biokompozito gaminiai esant skirtingam bioanglies kiekiui [5]

Kanapių biokompozito gamybai Benfratello ir kt. [4], naudojo tik spalčius, susmulkintus nuo 2 iki 8 mm granulometrijos. Atitinkamai pagal bandymo rūšį naudojo formas. Laidumo ir lenkimo bandymams naudojo gretasienio formas (žr. 11 pav.), kurio kvadratinis pagrindas yra 30 cm, o aukštis – 4 ir 6 cm, o mechaniniams (suspaudimo) bandymams cilindras (žr. 11 pav.), kurio pagrindo skersmuo yra 10,2 -cm, o aukštis – 16,6 -cm. Gamybai naudojo tokį planą: susmulkinę tinkamos granulometrijos kanapių spalčius, juos sumaišė su vandeniu hidraulinėmis kalkėmis ir paprastomis kalkėmis santykiu 4:1 bei paskirstė į formas. Po 4 dienų išformavo bandinius ir po 7 dienų dėjo 6 dienoms į termostatinę kamerą 50 °C temperatūroje. Tada svėrė bandinį kasdien, kol svoris stabilizavosi ir atliko su juo bandymus.



**11 pav.** Kanapių biokompozito gamybai naudota stačiakampio gretasienio( dešinėje) ir cilindro (kairėje) formos [4]

Autoriai Sashraf'as ir kt. [33] gamino biokompozitą naudodami medienos drožles, smėlį, žvyrą, cementą ir vandenį. Maišant laikėsi W/C santykio – 0,49, ir gamino bandinius, didindami drožlių masę atitinkamai 0, 5, 10, 15, 30 ir 50 procentų. Visi mišiniai buvo sumaišyti laboratoriniame maišytuve su a tūrio talpa 0,056 m<sup>3</sup>. Cementas, smulkus užpildas, rupus užpildas ir medžio drožlės pirmiausia buvo maišomi 1–2 min sausai. Pasiekus homogeninį pasiskirstymą, vanduo pilamas palaipsniui ir maišomas dar 2 min. Įsitikinus, kad mišinys tinkamas, pilamas į formeles ir vibruojamas ant vibracinio stalo. Tada mišinio perteklius buvo pašalintas ir bandinio paviršius išlyginamas su plienine mentele. Bandiniai buvo padengti plastikiniu maišeliu 24 valandoms, kad palaikytų drėgmę. Po to egzemplioriai buvo išformuoti ir įdėti į kietėjimo baką.

Autoriai Liu ir kt. [40] nustatė, kada apdorotų medienos plaušų kompozitų gniuždomasis stipris ir kitos mechaninės savybės yra didesnės nei neapdorotų pluoštų.

### Problemos gamybos metu

Biokompozitų gamyboje susiduriama su tam tikrais apdorojimo iššūkiais, kurie trukdo platesniam jų pritaikymui, pvz., hidrofiliškumas, dėl kurio prastai suderinamas su matrica ir sumažėja stiprumas drėgmėje ar drėgnoje aplinkoje, taip pat nenuspėjamas ilgaamžiškumas, ypač gaminių, kurių apkrova yra pastovi, biologinių medžiagų kintamumas. Dervos ir pluošto savybės, dėl kurių skiriasi biokompozito savybės ir nejautrumas šilumai bei drėgmei [22].

Autoriai Pantawee'as ir kt. [39] atliko tyrimą, kurio metu kanapių spalius apdorojant  $Al_2(SO_4)$  pašalino lignino kiekį, kuris trukdė rištis užpildui su rišikliu.

### **2.4. Biokompozito panaudojimas statyboje**

Biokompozitai yra labai svarbūs statybų pramonės tvarumui, nes yra tvarios, saugios, pigios ir lengvos medžiagos. Šiuo metu juos naudoja pluošto/cemento kompozitų, tvorų, paklotų, dailylenčių, durų, langų, tiltų ir kitų elementų gamybai [22]. Tačiau dėl aplinkos taršos statybos sektoriuje šios medžiagos naudojamos dažniausiai kaip nedidelės apkrovas laikančios konstrukcijos [29]. Statybos pramonėje biokompozitai naudojami dėl specifinio standumo, svorio ir natūralaus suirimo [30]. Žaliųjų pastatų koncepcija remiasi biokompozitų naudojimu jų konstrukcijose, kurias galima suskirstyti į du tipus: konstrukcines dalis, pavyzdžiui, tiltus ir stogo konstrukcijas, ir nekonstrukcines dalis, tokias kaip langai, išorės dalys, plokštės ir durų staktos [31]. Nestruktūrinių dalių pavyzdys yra „NetComposites“ fasadinės plokštės, kurias sukūrė 13 partnerių bendradarbiavimo projektas, kuriuo siekiama bent 50 % sumažinti pastato komponentų energiją. Fasado plokštė yra 4 m aukščio ir 2,3 m pločio (žr. 12 pav.) ir sudaryta iš dviejų biokompozitinių išorinių lino ir biodervos apvaskalų bei centrinio izoliacinės medžiagos sluoksnio [31].



**12 pav.** Sukurtas fasadas iš biokompozitinių plokščių [31]

Taip pat ilgą laiką statyboje naudojamas ir plačiai ištirtas biokompozito gaminys yra arbolito blokeliai (žr. 13 pav.), bei blokeliai „Durisolis“ (žr. 14 pav.). Arbolitas gaminamas iš cemento ir organinio užpildo, kurį sudaro spygliuočių medžių drožlės ar kapoti medvilnės stiebai, ryžių šiaudai, linų bei kanapių stiebai. Gaminiai gali būti naudojami kaip termoizoliacinė ar konstrukcinė medžiaga, esant nedideliems apkrovimams. Blokelio tankis kinta nuo 400 iki 850  $kg/m^3$ , šilumos laidumas svyruoja nuo 0,08 iki 0,17  $W/m^{\circ}C$ , atsparumas ugniai išlaikomas 90 minučių, kai temperatūra yra 1000  $^{\circ}C$  [23]. Yra išskiriamos ir blogosios savybės: Arbolito blokelių medžiaga yra higroskopiška, taip pat netiksli blokelių geometrija bei mažas atsparumas šalčiui. Nepaisant to, šie blokeliai sėkmingai naudojami nedidelių namų statybai. Panašus gaminys į Arbolito blokelius yra Durisolio blokeliai. Šie blokeliai gaminami naudojant portlandcementį ir spygliuočių medienos atliekas. Blokeliai yra ugniai atsparūs ir pasiekia klasę REI 180, garsą izoliuojantys, atsparūs drėgmei, sienų ilgaamžiškumas gali

būti iki 200 metų [24]. Durisolio blokeliai naudojami kaip termoizoliacinė medžiaga bei konstrukcija, kuri plačiai pritaikoma įvairioms statyboms, net ir daugiabučiams namams.



**13 pav.** Arbolito blokelis [23]



**14 pav.** Durisolio blokelis [24]

Autoriai Benfratello ir kt. [4] nustatė, jog kanapių ir kalkių biokompozitas pasižymi labai geromis savybėmis, kurios leistų jį panaudoti statyboje. Vienas iš pavyzdžių, kad šis biokompozitas galėtų būti kaip papildomas sluoksnis laikančioje sienoje arba kartu su mediena, kaip pati laikančioji siena. Taip pat būtų galima panaudoti srityse, kur negalima perkrauti konstrukcijos, pavyzdžiui, įrengiant žalią dangą ant jau esančio pastato. Autoriai išskiria, kad šis biokompozitas (medžiaga) yra ekologinė ir ekonominė, nes sąnaudos jo gamybai yra žymiai mažesnės nei įprastoms medžiagoms.

Pasak Jeon'o ir kt. [5] medienos biokompozito gaminius galima panaudoti kaip apdailos medžiagą, ji turi geras izoliacines savybes, vandens kiekio kontrolę ir prisitaikymo prie klimato kaitos kaip žaliaji medžiaga, renkanti anglies dioksidą.

Carus'as ir kt. [32] paskelbė, kad biopolimerinių gaminių kainos gali būti iki trijų kartų didesnės nei įprastų medžiagų. Svarbu paminėti, kad biokompozitų naudojimas grindžiamas aplinkos saugojimu, jog būtų kuo mažiau išskiriama anglies dvideginio, kuris būtų surenkamas, bei medžiagos pačios suirtų.

Nepaisant daugelio veiksnių, skatinančių naudoti biokompozitus, iš pramonės statistikos matyti, kad biokompozitai vis dar nėra lyginami su įprastomis medžiagomis pagal įsisavinimą rinkoje. Dauguma dabartinių biokompozitų yra skirti produkto vertimui arba medžiagos pakeitimui nekeičiant gaminių dizaino ar gamybos infrastruktūros [25]. Šias priežastis galima plačiai suskirstyti į techninius ir suvokimo aspektus [26].

### 3. Sudėtis ir tyrimų metodologija

#### 3.1. Biokompozito sudėtis ir gamyba

Biokompozitų gamybai pasirinktos lapuočių smulkios ir spygliuočių stambios medienos atliekos jas maišant su cementu arba kalkėmis. Gaminant skirtingų sudėčių biokompozitus buvo atsirinkta viena tinkamiausia su cementu ir kita su kalkėmis sudėtis. Sudėtys buvo vertinamos pagal medžiagų rišimąsi tarpusavyje, tankį bei gniuždomąjį stiprumą.

Biokompozitams su cemento rišikliu pagaminti 9 skirtingi mišiniai (žr. 2 lentelę). Mišiniai skiriasi cemento, vandens kiekiu, pjuvenų rūšimi ir kiekiu, bei priedais.

2 lentelė. Biokompozitų sudėtys naudojant cementą

| Sudėtis<br>Nr. | Sudėtis kg/m <sup>3</sup>       |                   |                      |                         |           |         |
|----------------|---------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|-----------|---------|
|                | Portlandcementis<br>CEM I 42,5R | Vanduo            | Lapuočių<br>pjuvenos | Spygliuočių<br>pjuvenos | Dolomitas | Lipalas |
| C1             | 824                             | 585 <sup>1)</sup> | 315                  | -                       | -         | -       |
| C2             | 762                             | 929               | 146                  | 146                     | -         | -       |
| C3             | 817                             | 995               | 312                  | -                       | -         | -       |
| C4             | 401                             | 105               | 496                  | -                       | 146       | -       |
| C5             | 232                             | 372               | 284                  | -                       | 40        | 6       |
| C6             | 714                             | 526 <sup>1)</sup> | 94                   | 193                     | -         | -       |
| C7             | 436                             | 321 <sup>2)</sup> | 58                   | 199                     | -         | -       |
| C8             | 645                             | 475 <sup>3)</sup> | 85                   | 324                     | -         | -       |
| C9             | 675                             | 497 <sup>3)</sup> | -                    | 178                     | -         | -       |

Pastabos:  
<sup>1)</sup> Vandens masė išskaičiuota iš pamerktų pjuvenų vandenyje.  
<sup>2)</sup> Vandens masė išskaičiuota iš pamerktų pjuvenų CaCl<sub>2</sub> tirpale.  
<sup>3)</sup> Vandens masė išskaičiuota iš pamerktų pjuvenų Ca(OH)<sub>2</sub> tirpale.

Kadangi biokompozitai bandomi anksčiau nei po 28 parų kietėjimo, rišamąją medžiagą pasirinktas portlandcementis CEM I 42,5 R, dėl padidinto ankstyvojo stiprio augimo. Užpildams naudotos stambios ir smulkios frakcijos medienos pjuvenos.

C1 sudėtyje naudojamas portlandcementis ir smulkios lapuočių pjuvenos. Šioje sudėtyje pjuvenos naudojamos apdorotos tik vandeniu. Maišant mišinį, dėl per didelio drėgnumo, pridėta ir sausų pjuvenų.

Po C1 sudėties bandymo buvo įdomu sužinoti, kaip veikia sausos pjuvenos. C2 sudėtyje naudojamas portlandcementis, nemirkytos smulkios lapuočių ir stambios spygliuočių pjuvenos bei vanduo. Atliekant bandymus su šios sudėties bandiniais, pastebėta, jog stambios pjuvenos sutvirtina masę ir veikia kaip armavimas, o smulkios užpildo tuštymės ir suteikia bandiniui stiprumo. Tačiau bandiniai gavosi nepakankamai stiprūs.

C3 sudėtyje pakartota C1 sudėtis, tačiau naudotos nemirkytos smulkios lapuočių pjuvenos ir vanduo, kaip atskiras elementas. Atliekant bandymus negautas reikiamas gniuždomasis stiprumas, manoma, jog dėl mikro įtrūkimų, kurie atsirado džiūstant pjuvenoms bandinyje.

C4 ir C5 sudėtyse bandyta pritaikyti visiškai kitokius kiekius portlandcemenčio bei pjuvenų, atskirai pilant vandenį ir pridėdant dolomito atsijų, o C5 sudėtyje ir lipalo. Visgi, gauti rezultatai nedžiugino stiprumo atžvilgiu, taip pat, sudėtys nepasiteisino dėl bandinių suirimo formuojant ir medžiagų tarpusavio nesusirišimo.

C6, C7, C8 sudėtyse naudotos mirkytos pjuvenos tik vandenyje,  $\text{Ca(OH)}_2$  tirpale ir  $\text{CaCl}_2$  tirpale. Tačiau neatsirinkus reikiamo pjuvenų drėgnumo, kiekvienoje sudėtyje sumaišius portlandcementį su mirkytomis pjuvenomis tekdavo pridėti tam tikrą kiekį sausų pjuvenų, kad būtų galima supresuoti bandinius. Mirkytos pjuvenos suteikė bandiniams vientisumą bei geresnį kietėjimo procesą, bet sausos pjuvenos susilpnindavo bandinius. Nuspręsta, pasirinkti reikiamą mirkytų pjuvenų drėgnumą ir nedėti sausų pjuvenų.

C9 sudėtis formuota atsižvelgiant į visas ankstesnėse sudėtyse gautas išvadas. Todėl sudėtyje naudotas tik portlandcementis ir reikiamo drėgnumo, mirkytos  $\text{Ca(OH)}_2$  tirpale, smulkios ir stambios frakcijos, spygliuočių pjuvenos. Su šia sudėtimi bandiniai kietėja tolygiai, nesusidaro mikro įtrūkimai ir pasiekiamas reikiamas gniuždomasis stiprumas.

Biokompozitų su kalkių rišikliu sudėtys pateikiamos lentelėje (žr. 3 lentelę).

**3 lentelė.** Biokompozitų sudėtys naudojant kalkes

| Sudėties Nr. | Sudėtis $\text{kg/m}^3$ |                   |                   |                      |
|--------------|-------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
|              | Kalkės 459-1 CL 90-S    | Vanduo            | Lapuočių pjuvenos | Spygliuočių pjuvenos |
| K1           | 547                     | 666               | 105               | 105                  |
| K2           | 546                     | 665               | 209               | -                    |
| K3           | 363                     | 268 <sup>1)</sup> | 48                | 182                  |
| K4           | 347                     | 255 <sup>2)</sup> | 46                | 174                  |
| K5           | 388                     | 286 <sup>3)</sup> | 51                | 195                  |
| K6           | 376                     | 276 <sup>2)</sup> | 50                | 188                  |
| K7           | 545                     | 401 <sup>2)</sup> | -                 | 144                  |

Pastabos:  
<sup>1)</sup> Vandens masė išskaičiuota iš pamerktų pjuvenų vandenyje.  
<sup>2)</sup> Vandens masė išskaičiuota iš pamerktų pjuvenų  $\text{CaCl}_2$  tirpale.  
<sup>3)</sup> Vandens masė išskaičiuota iš pamerktų pjuvenų  $\text{Ca(OH)}_2$  tirpale.

Kiekvienoje sudėtyje naudojamos 459-1 CL 90-S rūšies paprastos kalkės. Užpildams naudotos stambios ir smulkios frakcijos medienos pjuvenos.

K1 sudėtyje naudojamos kalkės, vanduo ir smulkios spygliuočių bei stambios lapuočių nemirkytos pjuvenos. Nors bandinių tankis mažas, tačiau nepasiekiamas reikiamas gniuždomasis stiprumas.

K2 sudėtis yra kaip ir K1, tik bandyta naudoti vien tik smulkias nemirkytas lapuočių pjuvenas. Sudėtis netinkama gamybai dėl atsiradusių mikro įtrūkimų kietėjimo metu, staigaus suirimo ir mažo gniuždomojo stiprumo.

K3, K4, K5 ir K6 sudėtyse naudojamos kalkės, mirkytos pjuvenos bei pridėdamos sausų pjuvenų kiekis, drėgnumo pertekliui pašalinti. Pagal gautus rezultatus, sužinota, kuris pjuvenų apdirbimo

būdas tinkamiausias bandiniams su kalkėmis. Kadangi sausos pjuvenos susilpnindavo bandinius, nuspręsta naudoti tik mirkytas pjuvenas geriausiame tirpale.

K7 sudėtis formuota atsižvelgiant į visas ankstesnėse sudėtyse gautas išvadas. Todėl sudėtyje naudotos tik kalkės ir reikiamo drėgnumo, mirkytos  $\text{CaCl}_2$  tirpale, smulkios ir stambios frakcijos, spygliuočių pjuvenos. Su šia sudėtimi bandiniai kietėja tolygiai, nesusidaro mikro įtrūkimai ir pasiekiamas reikiamas gniuždomasis stiprumas.

### 3.2. Tyrimų metodologija

#### Medžio drožlių apdorojimo metodologija

Atlikus kelis bandymus su sausomis ir išmirkytomis pjuvenomis, nuspręsta naudoti mirkytas pjuvenas, dėl masės vientisumo ir bandinio stiprumo. Pasvėrus po 400 g smulkių bei stambių pjuvenų, jos buvo sudėtos į tris atskiras talpas. Į kiekvieną talpą buvo įpilama 8,168 kg vandens. Vienoje talpoje pjuvenos užmerktos tik su vandeniu, kitoje jos užpiltos vandeniu ir įdėta 226 g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  miltelių, o trečioje užpiltos vandeniu, kuriame ištirpintos 226 g  $\text{CaCl}_2$  granulės (žr. 15 pav.).



**15 pav.** Pamerktos pjuvenos: kairėje tik su vandeniu, viduryje su  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  milteliais, dešinėje su  $\text{CaCl}_2$  granulėmis

Išmirkytas pjuvenas pradėta naudoti praėjus savaitei po pamerkimo. Šis laiko tarpas pasirinktas, kad pjuvenos išigertų vandens ir pasisavintų priedus. Prieš dedant pjuvenas į mišinius reikia pašalinti vandens perteklių.

#### Biokompozito maišymo metodai

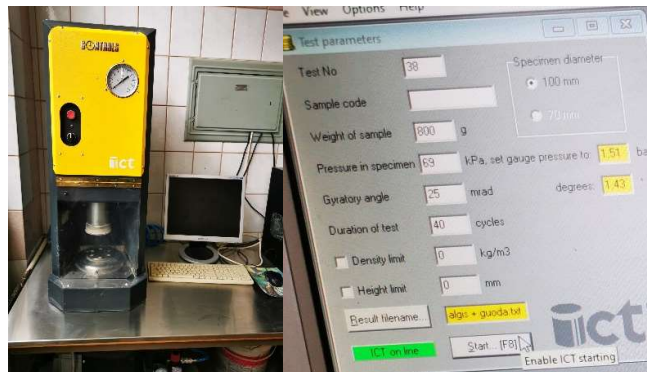
Reikiamos sudėties mišiniai kiekvienam bandymui buvo sumaišyti su automatiniu maišytuvu (žr. 16 pav.). Kadangi biokompozitams nėra atlikti bandymai su maišykle, tai maišymo programa pasirinkta „manual“, kuri suteikia galimybę reguliuoti maišymo greitį ir maišymo trukmę. Medžiagos visada maišomos tokiu pat eiliškumu: į talpą pilama pusė pjuvenų masės, ant jų pilamas rišiklis (cementas arba kalkės), kartais dolomitas, kai reikia pilamas vanduo ir likusi pjuvenų dalis. Mišinys lėtai maišomas apie 30 s, po to pajungiamas greitasis režimas ir dar maišoma apie 1 min 30 s. Sumaišytas mišinys suspaudus rankoje turi išlaikyti suspaudimo formą, tačiau nebūti per šlapias.



16 pav. Masės maišymo prietaisas „AUTOMIX“

### Biokompozito presavimo metodai

Bandiniai presuojami su presavimo įrenginiu gyrotoriumi (žr. 17 pav.). Mišinys pilamas į įrenginiui skirtą talpą, užpildant 2/3 talpos tūrio. Paruošta presavimui talpa dedama į gyrotorių. Programoje nustatomas supilto mišinio svoris, 69 kPa slėgis bandinyje ir 40 ciklų bandymo trukmė. Supresuotas bandinys išstumiamas iš talpos, paimamas taip, kad nesutrupėtų ir padedamas kietėti.



17 pav. Bandinių presavimo įrenginys gyrotorius

### Biokompozito kietinimo metodai

Pagamintų bandinių kietinimui pasirinkti du būdai: natūraliai ore ir anglies dioksido dujų kameroje. Kietinant kameroje palaikoma 20 °C temperatūra, santykinis drėgnumas 68 %, anglies dioksido koncentracija nustatoma 19 % (žr. 18 pav.). Kietinant ore (natūraliomis sąlygomis) temperatūra svyruoja nuo 20±2 °C, santykinis drėgnumas patalpoje apie 50±10 % (žr. 19 pav.).





18 pav. Bandinių kietinimo sąlygos CO<sub>2</sub> kameroje

Kietinant CO<sub>2</sub> kameroje bandiniai buvo laikomi dieną ir tris dienas. Šie skirtingi laikymo intervalai pasirinkti siekiant nustatyti kokią įtaką biokompozito mechaninėms savybėms turi kietinimo trukmė. Karbonizuojant bandinius tikimasi, kad bus pagerintos jo savybės ir utilizuotos CO<sub>2</sub> dujos.



19 pav. Bandinių kietinimo ore sąlygos

### Bandinių tankio nustatymas

Tankio nustatymas pradedamas nuo bandinių tūrio apskaičiavimo. Išmatavus bandinių aukštį bei skersmenį apskaičiuojamas bandinio tūris. Pasvėrus bandinius ir apskaičiavus tūrį, pagal formulę, skaičiuojamas tankis (žr. 1 formulę). Tankis skaičiuojamas remiantis LST EN 12390-7 standartu [41]:

$$\rho = \frac{m}{V}; \quad (1)$$

čia  $\rho$  – tankis, kg/m<sup>3</sup>;

$m$  – bandinio masė, išmatuota prieš atliekant bandymą, kg;

$V$  – bandinio tūris, m<sup>3</sup>.

### Biokompozito gniuždymo metodas

Kadangi biokompozitams nėra sukurti standartai, tai pagamintų bandinių stiprumas nustatomas remiantis LST EN 12390-4 standartu [42]. Cilindro formos bandiniai, kurių skersmuo 100±2 mm,

apkraunami 100 N per sekundę iki visiško suirimo. Bandiniai gniuždomi su presais (žr. 20 pav.). Stipris gniuždant apskaičiuojamas pagal formulę (žr. 2 formulę):

$$f_c = \frac{F}{A_c}; \quad (2)$$

čia  $f_c$  – gniuždomasis stipris, MPa;

$F$  – didžiausia jėga, kuria apkrautas bandinys, kN;

$A_c$  – bandinio skerspjūvio plotas, mm.



20 pav. Gniuždymo bandymui naudoti presai „Toni Technik“

### Biokompozito karbonizacijos gylio nustatymas

Norint nustatyti karbonizacijos gylį, reikia panaudoti fenolftaleino indikatorius. Šis indikatorius suteikia galimybę išsiaiškinti ar terpė yra bazė ar rūgštis. Kai bandinių pH viršina 8,2 vertę, užpurškus fenolftaleino matysis rožinė spalva, terpė bazinė, o jeigu pH bus iki 8,2 vertės, tai užpurškus fenolftaleino bandinys nenusidažys, silpnai šarminė terpė. Proceso metu, kai ant bandinio užpurškiamas indikatorius, fenolftaleinas reaguoja su  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dalelėmis, kurios palaiko šarminę terpę bandinyje. Norint išmatuoti karbonizacijos gylį bandinyje, jis perskeliamas per pusę, paviršius nuvalomas ir užpurškiamas fenolftaleino indikatorius. Praėjus kelioms sekundėms, kai atsiranda paviršiuje spalvos, su liniuote išmatuojamas ilgis, nenusispalvinusiame plote, (žr. 21 pav.). Taip sužinoma kiek giliai bandinys karbonizavosi.



21 pav. Ant perskelto bandinio užpurškštas fenolftaleino indikatorius ir išmatuotas karbonizacijos gylis

### pH vertės nustatymo metodas

Vertės nustatymas atliekamas pagal standartą LST EN ISO 1039:2022. Bandymas atliekamas elektrodu, 1:5 pelenų ir tirpalo vandens santykiu [43]. Į atskiras talpas supilamas nusistovėjęs pjuvenų tirpalas. Į talpą su tirpalu įdedamas pH matuoklis ir palaikomas, kol nusistovi rodmenys (žr. 22 pav.). Nusistovėjus rodmenims, pH vertė užfiksuojama ir nustatoma tirpalo terpė, remiantis pH skale.



22 pav. pH vertės nustatymas su matuokliu

### **Biokompozitų vandens įgeriamumo nustatymas**

Bandinių vandens įgeriamumas nustatomas talpoje su vandeniu. Pasirinkti bandiniai pasveriami, išmatuojamos skersmens ir aukščio vertės. Išmatuoti bandiniai sudedami į švarią talpą ir pilamas vandentiekio vanduo, kol bandiniai pilnai apsemiami (žr. 23 pav.). Apsemti bandiniai laikomi dvi savaites. Praėjus reikiamam laikui, bandiniai išimami iš talpos, kad pasišalintų perteklinis vanduo. Po bandymo bandiniai pasveriami, išmatuojami ir sugniuždomi.



23 pav. Biokompozitų vandens įgeriamumo bandymas

## 4. Tyrimo rezultatai ir analizė

### 4.1. Mirkytų medienos pjuvenų pH vertės bei paruošimo įtaka biokompozito savybėms

#### pH vertės

Pagal antrame skyriuje aprašytą metodiką išmatuotos tirpalų pH vertės. Lapuočių smulkių pjuvenų, kurios buvo pamerktos vandenyje be priedų, pH vertė yra 5,34. Lapuočių smulkių ir spygliuočių stambių pjuvenų ištirti trys tirpalai: su  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  priedu pH vertė yra 11,85, su  $\text{CaCl}_2$  priedu vertė siekia 5,71, o tik vandenyje pH vertė yra 6,58. Spygliuočių smulkių ir stambių pjuvenų tirti du tirpalai: su  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  priedu pH vertė yra 12,0, o su  $\text{CaCl}_2$  priedu vertė siekia 6,63. Iš gautų rezultatų matoma, jog pjuvenos pamerktos su  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  priedu yra šarminė terpė, o tik vandenyje ir su  $\text{CaCl}_2$  priedu yra beveik neutrali terpė, nes terpės, kurių pH vertės kinta tarp 8 ir 14, vadinamos šarminėmis, o kai pH vertės yra  $\pm 7$ , tai terpė yra neutrali.

#### Paruošimo įtaka biokompozito savybėms

Išmirkius pjuvenas, medžiagos geriau rišasi tarpusavyje, neatsiranda džiūvimo metu mikro įtrūkimai ir dėl to pagerėja bandinių stiprumas. Atlikus kelis bandymus su skirtingai pamerktomis pjuvenomis ir cementu pastebėta, kad rišiklis geriausiai reaguoja su pjuvenomis, išmirkytomis  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tirpale. Bandiniai įgyja 37 % didesnę gniuždymo stiprumą nei su kitais dviem pjuvenų paruošimo būdais (tik vandenyje ir  $\text{CaCl}_2$  tirpale, žr. 12 lentelę). Viską pakartojus su kalkėmis išaiškėjo, kad kalkėms tinkamiausias pjuvenų paruošimas su  $\text{CaCl}_2$  granulėmis. Bandiniai įgyja 20 % didesnę gniuždymo stiprumą lyginant su kitais dviem paruošimo būdais (žr. 13 lentelę). Taigi, svarbu atsirinkti, kokioje terpėje rišikliai geriausiai rišasi su užpildais.

### 4.2. Kietinimo $\text{CO}_2$ kameroje įtaka bandinių savybėms






Kietinimo metodika  $\text{CO}_2$  kameroje pateikiama antrame skyriuje (žr. 24 psl.). Ši metodika naudojama sumažinti anglies dioksido emisiją ir pastiprinti bandinius. Pagal gautus tankių ir gniuždomojo stiprio rezultatus matoma, kad efektyviausias kietinimo laikas yra 3 paros. Bandinių su cemento rišikliu tankis padidėjo 7 %, o gniuždomasis stipris padidėjo 24 %. Bandinių su kalkėmis tankis padidėjo 20 %, o gniuždomasis stipris padidėjo 3,5 karto (žr. 10, 11, 12, 13 lenteles). Pagal rezultatus galima teigti, kad kalkės geriau utilizuoja anglies dioksidą.




### 4.3. Karbonizacijos gylis

Karbonizacijos gylis nustatomas pagal pateikiamą metodiką (žr. 26 psl.). Panaudojus fenolftaleino indikatorių galima vizualiai matyti kokią dalį bandinyje paveikė anglies dioksidas. Biokompozitų su cementu išmatuoti karbonizacijos gyčiai pagal skirtingą kietėjimo laiką ir sąlygas pateikiami 4 lentelėje.

4 lentelė. Bandinių su cementu karbonizacijos gylio matavimo rezultatai

| Kietėjimo laikas, dienomis | Kietinimo metodas | Karbonizacijos gylis, cm | Vizualizacija | Pastabos |
|----------------------------|-------------------|--------------------------|---------------|----------|
|----------------------------|-------------------|--------------------------|---------------|----------|






|    |     |   |  |   |
|----|-----|---|--|---|
| 14 | Ore | - |    | Pilnai įvykusi karbonizacija, C4 sudėtis.   |
| 21 | ore | - |    | Beveik įvykusi karbonizacija. Bandinys dar gali sustiprėti, bet nedaug, C4 sudėtis. |
| 21 | ore | - |   | Pilnai įvykusi karbonizacija, C5 sudėtis.   |
| 14 | Ore | 3 |  | Sparčiai įvykusi karbonizacija dėl sausų pjuvenų, C2 sudėtis.                       |
| 14 | Ore | 2 |  | Sparčiai įvykusi karbonizacija dėl sausų pjuvenų, C3 sudėtis.                       |

|    |                             |     |   |   |
|----|-----------------------------|-----|---|---|
| 14 | CO <sub>2</sub><br>kameroje | 1,6 |   | Bandinys 3<br>paras<br>karbonizuotas<br>CO <sub>2</sub><br>kameroje, C9<br>sudėtis. |
| 14 | CO <sub>2</sub><br>kameroje | 1,2 |   | Bandinys 1<br>para<br>karbonizuotas<br>CO <sub>2</sub><br>kameroje, C9<br>sudėtis.  |
| 14 | ore                         | 1   |  | Bandinys<br>kietėjo tik<br>ore, C9<br>sudėtis.                                      |

Pagal gautus rezultatus matome, kad bandiniai kietėdami dar sustiprės. Biokompozitų su kalkėmis karbonizacijos gylio nustatymo rezultatai pateikiami 5 lentelėje.

**5 lentelė.** Bandinių su kalkėmis karbonizacijos gylio matavimo rezultatai

| Kietėjimo<br>laikas,<br>dienomis | Kietinimo<br>metodas | Karbonizacijos<br>gylis, cm | Vizualizacija  | Pastabos       |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------------|--|----------------|
| 14                               | ore                  | 1,8                         |  | K1<br>sudėtis. |

|    |                             |     |  |  |
|----|-----------------------------|-----|--|--|
| 14 | CO <sub>2</sub><br>kameroje | 2,9 |    | Bandinys<br>3 paras<br>kietėjo<br>kameroje,<br>K5<br>sudėtis.  |
| 14 | CO <sub>2</sub><br>kameroje | 3,4 |    | Bandinys<br>3 paras<br>kietėjo<br>kameroje,<br>K3<br>sudėtis.  |
| 14 | CO <sub>2</sub><br>kameroje | 2,9 |   | Bandinys<br>3 paras<br>kietėjo<br>kameroje,<br>K4<br>sudėtis.  |
| 14 | ore                         | 1   |  | K2<br>sudėtis.   |
| 14 | CO <sub>2</sub><br>kameroje | 2,5 |  | Prieš<br>įdedant į<br>kamerą<br>kelias<br>dianas<br>kietėjo<br>ore.<br>Kameroje<br>laikyta 1<br>parą, K7<br>sudėtis. |

|    |                             |     |  |   |
|----|-----------------------------|-----|--|---|
| 14 | CO <sub>2</sub><br>kameroje | 3,6 |  | Prieš įdedant į kamerą kelias dienas kiėtėjo ore. Kameroje laikyta 3 paras, K7 sudėtis. |
|----|-----------------------------|-----|--|---|

Pagal vizualizacijas matosi, jog bandiniai su kalkėmis geriau utilizuoja anglies dioksidą nei bandiniai su cementu. Bandiniuose C2, C3, C4 sparčiai įvyko karbonizacija dėl naudotų sausų pjuvenų, tačiau K1 ir K2 bandiniuose, kuriuose taip pat naudotos sausos pjuvenos, karbonizacija beveik neįvyko. Kiek kitokie rezultatai kai bandiniai karbonizuoti CO<sub>2</sub> dujų kameroje. Palyginus C9 ir K7 rezultatus, galima matyti, kad bandiniai su cementu utilizavo 2 kartus mažesnę CO<sub>2</sub> kiekį nei bandiniai su kalkėmis.

Norint sužinoti kiek utilizuojama CO<sub>2</sub> dujų, neturint bandinių masių skirtumo, galima paskaičiuoti pagal titravimo metodą. Pagal chemines formules apskaičiuojamas CaO kiekis iš Ca(OH)<sub>2</sub> ir CaO santykio bei sužinoma kiek CaO yra viename kubiniame metre turint Ca(OH)<sub>2</sub> kiekį. Po to paskaičiuojama CaO dalis iš CaCO<sub>3</sub>, kur jis reaguoja su CO<sub>2</sub>. Vėliau pagal CaO, CO<sub>2</sub> ir CaCO<sub>3</sub> molinių masių proporcijas išskaičiuojamas sunaudoto CO<sub>2</sub> kiekis viename kubiniame metre. Pagal aprašytą metodiką, kietinant ore K7 bandinius utilizuota 77,2 g CO<sub>2</sub> dujų, o kietinant CO<sub>2</sub> dujų kameroje 3 paras utilizuotas dujų kiekis net 203,54 g, trečdalis biokompozito masės.

#### 4.4. Biokompozitų vandens įgeriamumas

Atlikus įgeriamumo bandymą galima vizualiai matyti paveiktus bandinių paviršius: lengvai braižomi, atsivėrę poros, prisigėrę vandens (žr. 27 pav.).



24 pav. Bandiniai po vandens įgeriamumo bandymo

Biokompozitų vandens įgeriamumas vertinamas pagal tankių bei gniuždomojo stiprumo pokyčius. Tankių rezultatai prieš bandymą ir po pateikiami lentelėse (žr. 6 ir 7 lenteles).

6 lentelė. Bandinių prieš vandens įgeriamumo bandymą tankių rezultatai



| <b>Bandinio Nr.</b> | <b>G, g</b> | <b>d, mm</b> | <b>h, mm</b> | <b>V, m3</b> | <b><math>\rho</math>, kg/m3</b> |
|---------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------|
| C9                  | 856,9       | 100,4        | 102          | 0,00081      | 1062                            |
| K7+CO <sub>2</sub>  | 616,4       | 99,4         | 84,5         | 0,00066      | 941                             |
| K7                  | 496,2       | 99,3         | 84,6         | 0,00065      | 758                             |
| C8                  | 646,9       | 101,4        | 110,09       | 0,00089      | 728                             |

**7 lentelė.** Bandinių po vandens įgeriamumo bandymo tankių rezultatai

| <b>Bandinio Nr.</b> | <b>G, g</b> | <b>d, mm</b> | <b>h, mm</b> | <b>V, m3</b> | <b><math>\rho</math>, kg/m3</b> |
|---------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------|
| C9                  | 1086,2      | 100,8        | 102,7        | 0,00082      | 1326                            |
| K7+CO <sub>2</sub>  | 835,8       | 99,6         | 84,3         | 0,00066      | 1273                            |
| K7                  | 814,5       | 99,6         | 84,5         | 0,00066      | 1238                            |
| C8                  | 1173,5      | 101,8        | 111,7        | 0,00091      | 1291                            |

Bandinių gniuždomųjų stiprių rezultatai pateikiami lentelės (žr. 8 ir 9 lenteles).

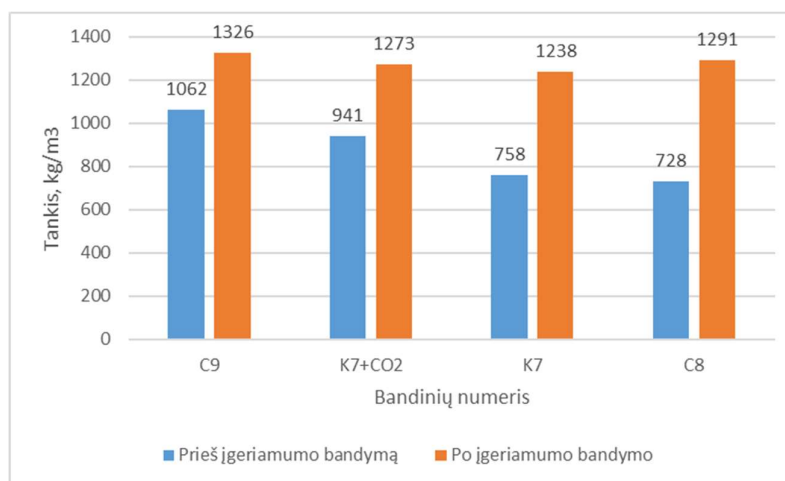
**8 lentelė.** Bandinių prieš vandens įgeriamumo bandymą gniuždomųjų stiprių rezultatai

| <b>Bandinio Nr.</b> | <b>G, g</b> | <b>d, mm</b> | <b>h, mm</b> | <b>f, kN</b> | <b>f, MPa</b> |
|---------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| C9                  | 856,9       | 100,4        | 102          | 51,2         | 6,47          |
| K7+CO <sub>2</sub>  | 616,4       | 99,4         | 84,5         | 19,1         | 2,46          |
| K7                  | 496,2       | 99,3         | 84,6         | 5,4          | 0,7           |
| C8                  | 646,9       | 101,4        | 110,09       | 13,7         | 1,7           |

**9 lentelė.** Bandinių po vandens įgeriamumo bandymo gniuždomųjų stiprių rezultatai

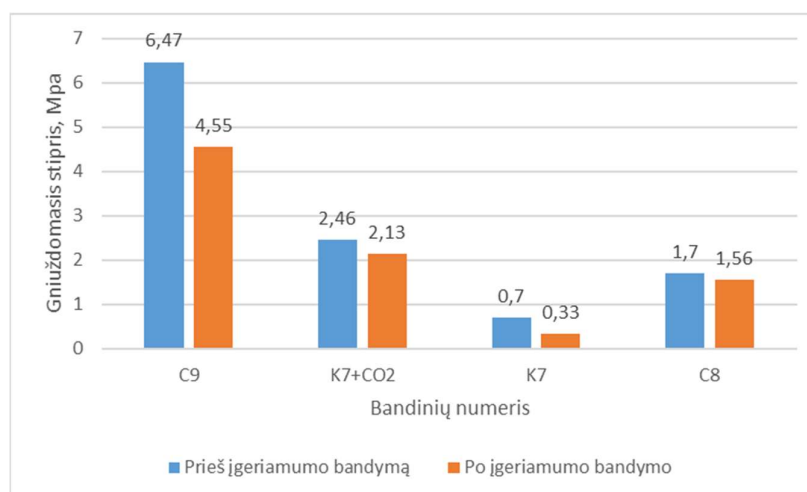
| <b>Bandinio Nr.</b> | <b>G, g</b> | <b>d, mm</b> | <b>h, mm</b> | <b>f, kN</b> | <b>f, MPa</b> |
|---------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| C9                  | 1086,2      | 100,8        | 102,7        | 36,3         | 4,55          |
| K7+CO <sub>2</sub>  | 835,8       | 99,6         | 84,3         | 16,6         | 2,13          |
| K7                  | 814,5       | 99,6         | 84,5         | 2,6          | 0,33          |
| C8                  | 1173,5      | 101,8        | 111,7        | 12,7         | 1,56          |

Bandinių tankių skirtumai prieš vandens įgeriamumo bandymą ir po pateikiami grafike (žr. 25 pav.). Pagal rezultatus matoma, kad C9 bandinių tankis padidėjo 24,9 %, K7+CO<sub>2</sub> bandinių tankis padidėjo 35,3 %, K7 bandinių tankis padidėjo 63,3 %, o C8 bandinių tankis padidėjo 77,3 %.



**25 pav.** Bandinių tankiai prieš ir po vandens įgeriamumo bandymo

Gniuždomųjų stiprių vertės prieš ir po bandymo pateiktos grafike (žr. 26 pav.). Matoma, kad C9 bandinys susilpnėjo 29,7 %, K7+CO<sub>2</sub> bandinys susilpnėjo 13,4 %, K7 bandinys susilpnėjo 52,9 %, o C8 bandinys susilpnėjo tik 8,2 %.



**26 pav.** Bandinių gniuždomieji stipriai prieš ir po vandens įgeriamumo bandymo

#### 4.5. Bandinių tankiai

Kiekvienas gautas bandinys ištirtas pagal antrame skyriuje aprašytą tankio nustatymo metodiką (žr. 25 psl.). Bandinių su cemento riškliu tankiai pateikiami lentelėje (žr. 10 lentelę). Gauti rezultatai rodo, kad tankiai kinta nuo 632 kg/m<sup>3</sup> iki 1174 kg/m<sup>3</sup>.

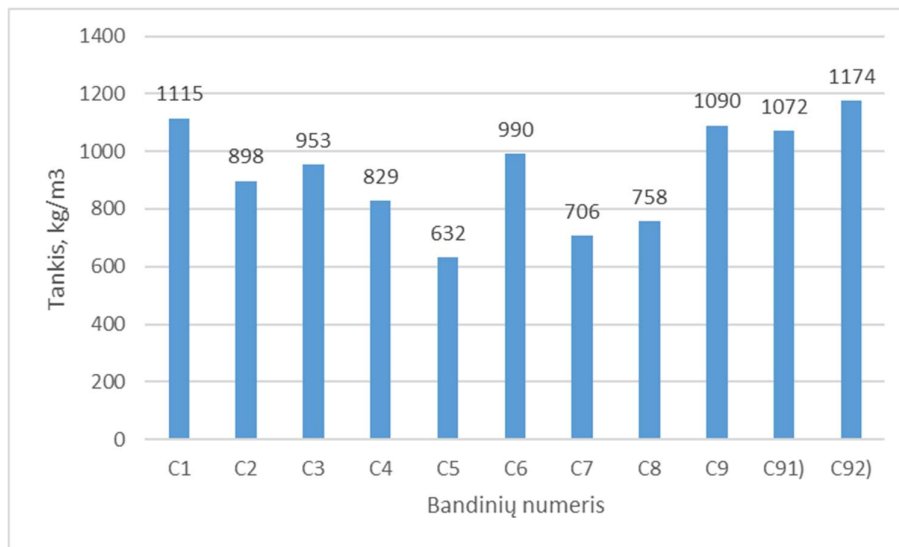
**10 lentelė.** Bandinių su cemento riškliu tankiai

| Bandinio Nr. | G, g   | d, mm | h, mm | V, m <sup>3</sup> | ρ, kg/m <sup>3</sup> |
|--------------|--------|-------|-------|-------------------|----------------------|
| C1           | 786,4  | 98,85 | 91,93 | 0,000705          | 1115                 |
| C2           | 636,07 | 99,9  | 90,43 | 0,000708          | 898                  |
| C3           | 630,39 | 99,48 | 85,12 | 0,000661          | 953                  |

|                                    |        |        |        |          |      |
|------------------------------------|--------|--------|--------|----------|------|
| C4                                 | 551,4  | 99,21  | 86,12  | 0,000665 | 829  |
| C5                                 | 498,3  | 100,45 | 99,6   | 0,000789 | 632  |
| C6                                 | 730,9  | 100,13 | 93,78  | 0,000738 | 990  |
| C7                                 | 543,95 | 101,8  | 94,69  | 0,00077  | 706  |
| C8                                 | 634,95 | 101,55 | 103,46 | 0,000838 | 758  |
| C9                                 | 866,5  | 100,72 | 99,86  | 0,000795 | 1090 |
| C9 <sup>1)</sup>                   | 899    | 101,67 | 103,38 | 0,000839 | 1072 |
| C9 <sup>2)</sup>                   | 899    | 100,4  | 96,74  | 0,000765 | 1174 |
| Pastabos:                          |        |        |        |          |      |
| 1) Bandinys karbonizuotas 1 parą;  |        |        |        |          |      |
| 2) bandinys karbonizuotas 3 paras. |        |        |        |          |      |

Bandinių su cementu tankių vertės pavaizduotos grafike (žr. 27 pav.).

Pagal gautus rezultatus, matoma, jog C1 bandinių tankis, kuriuose naudotos tik mirkytos smulkios pjuvenos ir cementas, yra 1115 kg/m<sup>3</sup>. C2 bandinių tankis 19 % mažesnis nei C1, o tam turėjo įtakos panaudotos sausos, smulkios ir stambios pjuvenos. C3 bandinių tankis 15 % mažesnis už C1 bandinių. Nors sudėtis tokia pati, tačiau vietoj mirkytų pjuvenų naudotos sausos sumažino bandinių tankį. C4 bandiniuose naudota dvigubai mažiau cemento nei prieš tai aptartuose bandiniuose, taip pat didžiausias kiekis sausų smulkių pjuvenų ir šiek tiek dolomito. Gautas tankis siekė 829 kg/m<sup>3</sup>, tačiau bandiniai gavosi per silpni. Gaminant C5 bandinius gautas pats mažiausias tankis, kuriam turėjo įtakos mažas cemento kiekis, pridėtas dolomitas bei sausos smulkios pjuvenos ir lipalas. Nors medžiagos rišosi geriau nei C4 bandiniuose, tačiau stiprumo vertės vis dar buvo per mažos. Gaminant C6 bandinius, atsižvelgus į prieš tai gautus rezultatus su sausomis pjuvenomis, nuspręsta pjuvenas mirkyti vandenyje. Gautas bandinių tankis, lyginant su C2 bandinių, yra 10 % didesnis. Gerėjant bandinių stiprumui, nuspręsta atrasti tinkamą pjuvenų mirkymo būdą. Palyginus C7 ir C8 bandinių tankius gauta, kad C8 bandinių tankis 7 % didesnis už C7. Tankių reikšmės, palyginus su prieš tai tirtais bandiniais, sumažėjo dėl papildomai į mišinius pridėtų sausų pjuvenų. Kadangi po paskutinių bandinių stiprumo reikšmės netenkino lūkesčių, nuspręsta C9 bandiniuose nedėti sausų pjuvenų. Lyginant C9 ir C8 bandinių tankius matoma, kad tankis padidėja 44 %. Toks ryškus pokytis yra dėl mažesnio pjuvenų kiekio bandiniuose. Taip pat, siekiant gauti geresnius rezultatus, C9 bandiniai kietinami CO<sub>2</sub> kameroje parą ir 3 paras. Bandinių tankis po paros kietinimo CO<sub>2</sub> kameroje gautas 2 % mažesnis nei bandinių kietintų ore, o kietinant tris paras bandinių tankis 7 % didesnis nei kietintų ore. Pagal gautus rezultatus galima teigti, kad pjuvenų kiekis ir dydis mažina tankį, o karbonizacija jį didina, nes bandiniai įsisavina anglies dioksido dujas.



27 pav. Biokompozito bandinių su cementu tankiai

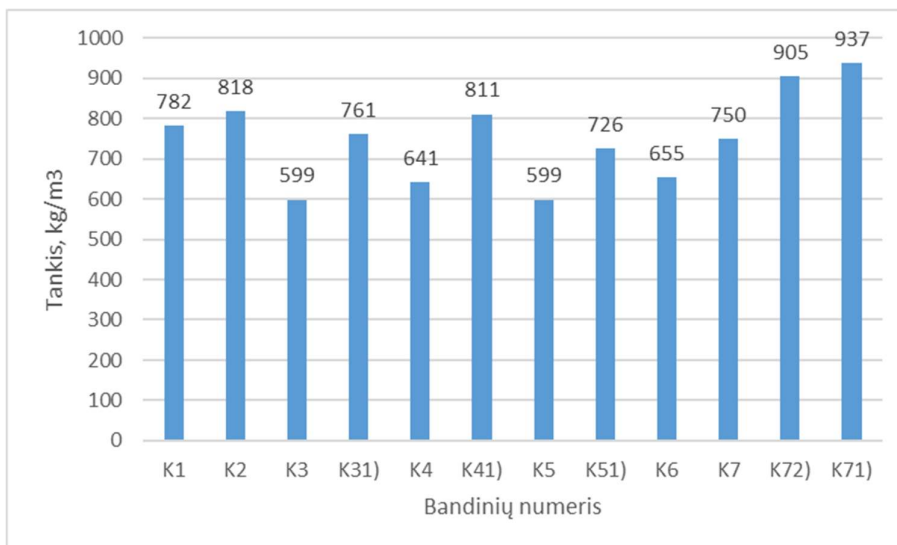
Bandinių su kalkių rišikliu tankiai pateikiami lentelėje (žr. 11 lentelę). Bandinių vertės kinta nuo 599 kg/m<sup>3</sup> iki 937 kg/m<sup>3</sup>.

11 lentelė. Bandinių su kalkių rišikliu tankiai

| Bandinio Nr.   | G, g   | d, mm  | h, mm | V, m <sup>3</sup> | ρ, kg/m <sup>3</sup> |
|--|--------|--------|-------|-------------------|----------------------|
| K1   | 515,16 | 99,54  | 84,66 | 0,000658          | 782                  |
| K2   | 539,07 | 99,49  | 84,85 | 0,000659          | 818                  |
| K3   | 418,71 | 100,1  | 88,9  | 0,000699          | 599                  |
| K3 <sup>1)</sup>   | 550,83 | 100,3  | 91,6  | 0,000723          | 761                  |
| K4   | 452,66 | 100,4  | 89,2  | 0,000706          | 641                  |
| K4 <sup>1)</sup>   | 568,08 | 100,2  | 88,9  | 0,000701          | 811                  |
| K5   | 416,27 | 100,1  | 88,4  | 0,000695          | 599                  |
| K5 <sup>1)</sup>   | 502,95 | 100    | 88,3  | 0,000693          | 726                  |
| K6   | 462,56 | 100    | 90    | 0,000707          | 655                  |
| K7   | 493,5  | 99,6   | 84,54 | 0,000658          | 750                  |
| K7 <sup>2)</sup>   | 597,4  | 99,82  | 84,4  | 0,00066           | 905                  |
| K7 <sup>1)</sup>   | 628    | 100,51 | 84,5  | 0,00067           | 937                  |
| Pastabos:<br>1) Bandiniai karbonizuoti 3 paras;<br>2) bandiniai karbonizuoti 1 parą. |        |        |       |                   |                      |

Bandinių su kalkėmis tankių vertės pavaizduotos grafike (žr. 28 pav.). Iš grafiko matyti, kad K1 ir K2 bandinių tankių vertės panašios, jų vidurkis 800 kg/m<sup>3</sup>. K1 bandiniuose naudotos sausos lapuočių ir spygliuočių pjuvenos, o K2 bandiniuose tik lapuočių pjuvenos. Galima teigti, kad pjuvenų rūšis nedaro įtakos bandinio tankiui. K3, K4, K5 bandinių tankis tirtas kietinant ore ir kietinant CO<sub>2</sub> kameroje 3 paras. Matoma, jog tankis kietinant kameroje padidėja apytiksliai 21 %. K7 bandiniai tirti

kietinant ore ir CO<sub>2</sub> kameroje parą bei 3 paras. Po vienos paros K7 bandinių tankis, lyginant su tankiu kietinant ore, padidėjo 17 %, o po trijų parų apie 20 %. Galima teigti, kad didžiausią įtaką tankio reikšmei daro karbonizacija, nes bandiniai įsisavina anglies dioksido dujas, dėl to didėja bandinių tankis.



**28 pav.** Biokompozito bandinių su kalkėmis tankiai

Lyginant geriausių sudėčių rezultatus gauta, kad bandiniai su cementu (C9) yra 31 % didesnio tankio nei bandiniai su kalkėmis (K7).

Pagal 7 paveikslėlį (žr. 16 psl.) galima nustatyti apytiksles šilumos laidumo vertes pagal tankį. Biokompozitų su cementu šilumos laidumas  $\lambda \approx 2,0$  W/mK, o biokompozitų su kalkėmis  $\lambda \approx 1,6$  W/mK.

#### 4.6. Bandinių gniuždymo stipris

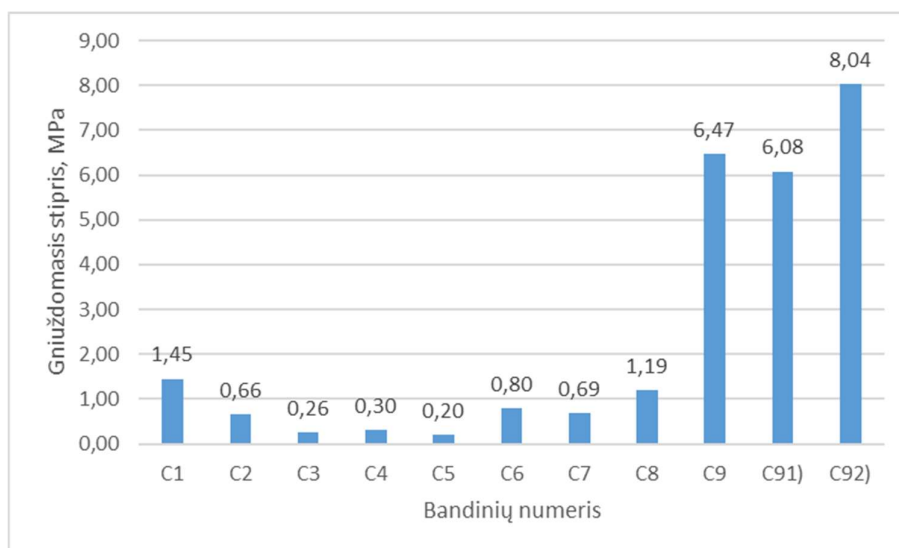
Bandinių gniuždomasis stipris tiriamas pagal antrame skyriuje aprašytą metodiką (žr. 26 psl.). Bandinių su cemento rišikliu gniuždomieji stipriai pateikiami lentelėje (žr. 12 lentelę). Bandinių gniuždomojo stiprumo vertės kinta nuo 0,2 MPa iki 8,04 MPa.

**12 lentelė.** Bandinių su cemento rišikliu gniuždomieji stipriai

| Bandinio Nr. | G, g   | d, mm  | h, mm  | F, kN | f, MPa |
|--------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| C1           | 786,4  | 98,85  | 91,93  | 11,11 | 1,45   |
| C2           | 636,07 | 99,9   | 90,43  | 5,15  | 0,66   |
| C3           | 630,39 | 99,48  | 85,12  | 2,03  | 0,26   |
| C4           | 551,4  | 99,21  | 86,12  | 2,29  | 0,30   |
| C5           | 498,3  | 100,45 | 99,6   | 1,59  | 0,20   |
| C6           | 730,9  | 100,13 | 93,78  | 6,3   | 0,80   |
| C7           | 543,95 | 101,8  | 94,69  | 5,59  | 0,69   |
| C8           | 634,95 | 101,55 | 103,46 | 9,6   | 1,19   |

|                                    |       |        |        |       |      |
|------------------------------------|-------|--------|--------|-------|------|
| C9                                 | 866,5 | 100,72 | 99,86  | 51,55 | 6,47 |
| C9 <sup>1)</sup>                   | 899   | 101,67 | 103,38 | 49,3  | 6,08 |
| C9 <sup>2)</sup>                   | 899   | 100,4  | 96,74  | 63,6  | 8,04 |
| Pastabos:                          |       |        |        |       |      |
| 1) Bandiniai karbonizuoti 1 parą;  |       |        |        |       |      |
| 2) Bandiniai karbonizuoti 3 paras. |       |        |        |       |      |

Bandinių su cemento rišikliu gniuždomieji stipriai pateikiami grafike (žr. 29 pav.). C1 bandinyje, panaudojus cementą ir mirkytas lapuočių pjuvenas, pasiektas 1,45 MPa stiprumas. Kadangi buvo įdomu sužinoti ar pjuvenų rūšis, dydis ir paruošimas turi įtakos bandinių stiprumui, gaminant C2 ir C3 bandinius naudotos sausos, skirtingų rūšių bei dydžio pjuvenos. Iš rezultatų matyti, kad C2 bandiniai, kuriuose naudotos smulkios lapuočių ir stambios spygliuočių pjuvenos, beveik 3 kartus stipresni nei C3 bandiniai, kuriuose naudotos tik smulkios lapuočių pjuvenos. Palyginus C1 ir C3 bandinių stiprumo vertes, C3 bandiniai beveik 6 kartus silpnesni nei C1. Pagal gautus rezultatus matoma, kad pjuvenų rūšis neturi įtakos bandinių stiprumui, o dydis ir išmirkymas padidina stiprumo vertes. Atlikus bandymus su C4 ir C5 bandiniais, kuriuose bandyta sumažinti cemento kiekį ir panaudoti dolomitą, gauti mažiausi stipriai, jie siekė 0,3 MPa ir 0,2 MPa vertes. Nepasiteisinus paskutinėms sudėtims ir atsižvelgus į ankstesnių bandinių išvadas, nuspręsta C6, C7 ir C8 bandiniuose naudoti skirtinguose tirpaluose pamerktas, spygliuočių stambias ir lapuočių smulkias pjuvenas. Rezultatuose matomas ryškus pokytis, kai skiriasi pjuvenų paruošimo terpė. Bandiniai C8, kuriuose naudotos pjuvenos iš Ca(OH)<sub>2</sub> tirpalo, beveik du kartus didesnio stiprumo nei bandiniai su pjuvenomis iš CaCl<sub>2</sub> tirpalo (C7), ir vandens (C6). Atsižvelgus į anksčiau padarytas išvadas pagaminti C9 bandiniai. Jų stiprumas 5,4 karto didesnis nei C8 bandinių. Siekiant dar geresnių rezultatų, bandiniai patalpinami į CO<sub>2</sub> dujų kamerą parai ir trims paroms. Lyginant n karbonizuotų ir karbonizuotų 1 parą bandinių gniuždymo stiprumas 6 % mažesnis, o išlaikytų tris paras net 24 % didesnis. Apskaičiuota, kad karbonizacija gali ketvirtadaliu padidinti gniuždomąjį stiprumą, tačiau bandiniai turi būti išlaikomi tris paras.



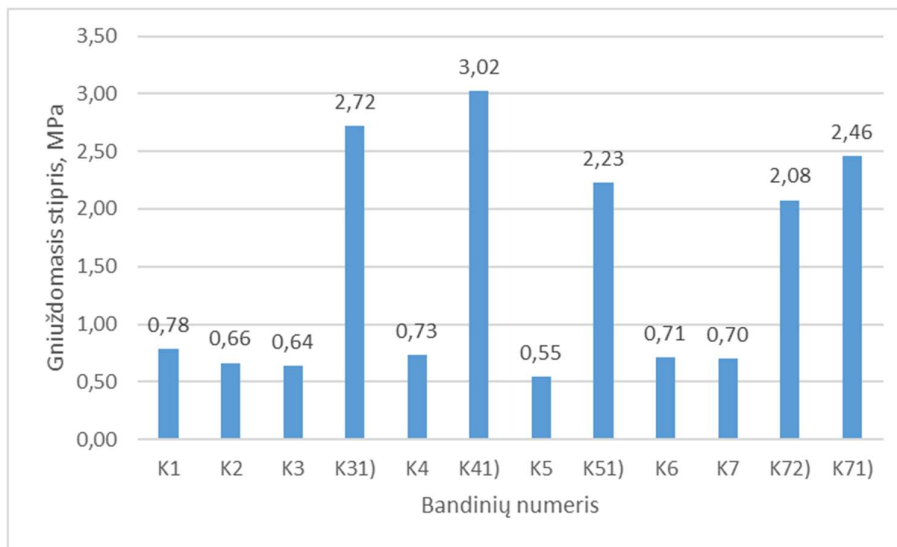
29 pav. Biokompozito bandinių su cementu gniuždomieji stipriai

Bandinių su kalkių rišikliu gniuždomieji stipriai pateikiami 13 lentelėje.

**13 lentelė.** Biokompozito bandinių su kalkių rišikliu gniuždomieji stipriai

| Bandinio Nr.   | G, g   | d, mm  | h, mm | F,kN  | f, MPa |
|--|--------|--------|-------|-------|--------|
| K1   | 515,16 | 99,54  | 84,66 | 6,08  | 0,78   |
| K2   | 539,07 | 99,49  | 84,85 | 5,16  | 0,66   |
| K3   | 418,71 | 100,1  | 88,9  | 5,01  | 0,64   |
| K3 <sup>1)</sup>   | 550,83 | 100,3  | 91,6  | 21,5  | 2,72   |
| K4   | 452,66 | 100,4  | 89,2  | 5,8   | 0,73   |
| K4 <sup>1)</sup>   | 568,08 | 100,2  | 88,9  | 23,8  | 3,02   |
| K5   | 416,27 | 100,1  | 88,4  | 4,3   | 0,55   |
| K5 <sup>1)</sup>   | 502,95 | 100    | 88,3  | 17,5  | 2,23   |
| K6   | 462,56 | 100    | 90    | 5,6   | 0,71   |
| K7   | 493,5  | 99,6   | 84,54 | 5,45  | 0,70   |
| K7 <sup>2)</sup>   | 597,4  | 99,82  | 84,4  | 16,25 | 2,08   |
| K7 <sup>1)</sup>   | 628    | 100,51 | 84,5  | 19,5  | 2,46   |
| Pastabos:<br>1) Bandiniai karbonizuoti 3 paras;<br>2) Bandiniai karbonizuoti 1 parą. |        |        |       |       |        |

Gniuždomieji stipriai su kalkių rišikliu pateikiami grafike (žr. 30 pav.). Iš grafiko matyti, kad K1 bandinių tankis 18 % didesnis nei K2, nes K1 bandiniuose naudotos sauso smulkios lapuočių ir stambios spygliuočių pjuvenos, o K2 bandiniuose tik sausos smulkios lapuočių pjuvenos. Nors išsiaiškinta, kad sumaišius skirtingų dydžių pjuvenas pasiekiami geresni rezultatai, tačiau stiprumo vertės gautos per mažos. Nusprendus, kad sausos pjuvenos susilpnina bandinius, K3, K4, K5 ir K6 bandiniuose naudotos skirtinguose tirpaluose pamerktos, spygliuočių stambios ir lapuočių smulkios pjuvenos. Rezultatuose matomas ryškus pokytis, kai skiriasi pjuvenų paruošimo terpė. Bandiniai K4, kuriuose naudotos pjuvenos iš CaCl<sub>2</sub> tirpalo, 25 % didesnio stiprumo nei bandiniai su pjuvenomis iš Ca(OH)<sub>2</sub> tirpalo (K5), ir 14 % stipresni nei bandiniai su pjuvenomis tik iš vandens (K3). Siekiant dar geresnių rezultatų, bandiniai patalpinami į CO<sub>2</sub> dujų kamerą parai arba trims paroms. Karbonizuojant K3, K4 ir K5 bandinius tris paras, lyginant su nekarbonizuotais bandiniais, stiprumas padidėjo daugiau nei 4 kartus. K7 bandiniai gaminti taip pat kaip ir K4. Siekiant išsiaiškinti karbonizacijos trukmės įtaką bandinio stiprumui bandiniai išlaikyti parą ir tris paras. Lyginant nekarbonizuotų ir karbonizuotų 1 parą bandinių stiprumas 3 kartus didesnis, o išlaikytų tris paras net 3,5 karto didesnis. Karbonizacija net ir po vienos paros ženkliai padidina bandinių stiprumą.



**30 pav.** Biokompozito bandinių su kalkėmis gniuždomieji stipriai

Išanalizavus gniuždomojo stiprumo rezultatus, matoma, kad bandiniai su cementu 3 kartus stipresni nei bandiniai su kalkėmis, tačiau lėčiau įsisavina CO<sub>2</sub> dujas ir mažesnę jų kiekį.



## Išvados

1. Tiriamajame darbe buvo pagaminti 9 skirtingų sudėčių biokompozito bandiniai su cemento rišikliu. Ištyrus bandinius, nustatyta, kad jų tankis kinta nuo  $632 \text{ kg/m}^3$  iki  $1174 \text{ kg/m}^3$ . Tankių vertės skiriasi dėl kelių priežasčių: cemento ir pjuvenų kiekio, pjuvenų dydžio ir paruošimo bei karbonizacijos. Biokompozitų gniuždymo stipris kinta nuo 0,2 MPa iki 8,04 MPa. Stiprumui didžiausią įtaką turi cemento ir pjuvenų kiekis bei karbonizacija.
2. Su kalkių rišikliu pagaminti 7 skirtingų sudėčių biokompozito bandiniai. Atlikus bandinių fizikinių ir mechaninių savybių nustatymą, gauta, kad jų tankiai kinta nuo  $599 \text{ kg/m}^3$  iki  $937 \text{ kg/m}^3$ . Tankių vertės skiriasi dėl kalkių bei pjuvenų kiekio bandiniuose, pjuvenų paruošimo būdo bei dydžio ir karbonizacijos. Biokompozitų gniuždymo stipris kinta nuo 0,55 iki 3,02 MPa. Stiprumui, kaip ir tankiui, didžiausią įtaką turi kalkių ir pjuvenų kiekis bei karbonizacija, kuri efektyvi net po vienos paros. Bandiniai su kalkėmis utilizuoja didesnę  $\text{CO}_2$  dujų kiekį nei bandiniai su cementu.
3. Nustatyta, kad naudojant išmirkytas pjuvenas, medžiagos geriau rišasi tarpusavyje, neatsiranda mikro įtrūkimai džiūvimo metu ir dėl to padidėja bandinių stiprumas. Atlikus kelis bandymus su skirtingai pamerktomis pjuvenomis ir cementu, pastebėta, kad šis riškis geriausiai reaguoja su pjuvenomis, išmirkytomis  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tirpale. Bandiniai įgyja 37 % didesnę stiprumą nei su kitais dviem pjuvenų paruošimo būdais (paveiktas vandenyje arba  $\text{CaCl}_2$  tirpale). Viską pakartojus su kalkėmis išaiškėjo, kad kalkėmis tinkamiausias pjuvenų paruošimas yra su  $\text{CaCl}_2$  tirpalu. Tokie bandiniai įgyja 20 % didesnę gniuždymo stiprį lyginant su kitais dviem pjuvenų paruošimo būdais pagamintais bandiniais.
4. Išlaikius presuotus biokompozitus  $\text{CO}_2$  dujomis prisotintoje kameroje jų fizikinės ir mechaninės savybės yra pagerinamos. Biokompozito su cemento rišikliu tankis padidėja 7 %, o gniuždymo stipris padidėja 24 %. Biokompozito su kalkėmis tankis padidėja 20 %, o gniuždymo stipris - net 3,5 karto.
5. Atlikus biokompozitų vandens įgeriamumo bandymus, nustatyta, kad jų gniuždymo stipris, po 14 dienų mirkymo vandenyje, susilpnėja iki 30 % nekarbonizuotiems cementiniams bandiniams, tačiau biokompozitai su kalkių riškliu po karbonizavimo susilpnėjo tik 13 %. Pagal gautus rezultatus, nustatytas efektyviausias karbonizacijos laikas yra trys paros.

## Literatūros sąrašas

1. DANISH, Khan ir WANG, Zhaohua. Does biomass energy consumption help to control environmental pollution? Evidence from BRICS countries. *Science of the Total Environment* [interaktyvus]. 2019, **670** [žiūrėta 2022-02-28]. ISSN 0048-9697. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.268>
2. WEI, Yongquan, SONG, Chunyu, CHEN, Bing ir AHMAD, Muhammed Riaz. Experimental investigation on two new corn stalk biocomposites based on magnesium phosphate cement and ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, **224** [žiūrėta 2022-02-28]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.100>
3. SELAMI A., MERZOUD M., AMZIANE S. Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetal fibers. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2013, **47**. ISSN 0950-0618. [žiūrėta 2022-03-02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.073>
4. BENFRATELLO S. ir kt. Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2013, **48** [žiūrėta 2022-03-13]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>
5. JEON, J. ir kt. Evaluation of hygrothermal performance of wood-derived biocomposite with biochar in response to climate change. *Environmental Research* [interaktyvus]. 2021, **193** [žiūrėta 2022-03-13]. ISSN 0013-9351. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110359>
6. *Global CO2 Emissions Rebounded to their Highest Level in History in 2021 - News*. 2022 [žiūrėta 2022-04-05]. Prieiga per: <https://www.iea.org/news/global-co2-emissions-rebounded-to-their-highest-level-in-history-in-2021>
7. BAHRAMI, Mohsen, ABENOJAR, Juana ir MARTINEZ, Miguel Angel. Recent Progress in Hybrid Biocomposites: Mechanical Properties, Water Absorption, and Flame Retardancy. *Materials* [interaktyvus]. 2020, **13(22)** [žiūrėta 2022-04-05]. EISSN 1996-1944. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/ma13225145>
8. RAHIM, M. ir kt. Characterization of flax lime and hemp lime concretes: hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy Build* [interaktyvus]. 2015, **88** [žiūrėta 2022-03-13]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043>
9. ARNAUD, L., AMZIANE, S., NOZAHIC, V., GOURLAY, E. Mechanical behavior, in bio-aggregate-based building materials: applications to hemp concretes; 2013, ISBN: 9781848214040, p. 153–76.
10. BRANDT, Andrzej M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2008, **86** [žiūrėta 2022-05-02]. ISSN 0263-8223. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>
11. FERREIRA, F. V. ir kt. LDPE-based composites reinforced with surface modified cellulose fibres: 3D morphological and morphometrical analyses to understand the improved mechanical performance. *European Polymer Journal* [interaktyvus]. 2019, **117** [žiūrėta 2022-05-02]. ISSN 0014-3057. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.05.005>
12. VÄISÄNEN, T., DAS, O., TOMPPU, L. A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2017, **149** [žiūrėta 2022-05-02]. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.132>

13. LU, Z., ZHAO, Z., WANG, M., JIS, W. Effects of corn stalk fiber content on properties of biomass brick. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2016, **127** [žiūrėta 2022-05-03]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.141>
14. JARABO, R. ir kt. Corn stalk from agricultural residue used as reinforcement fiber in fiber-cement production. *Industrial Crops and Products* [interaktyvus]. 2013, **43** [žiūrėta 2022-05-03]. ISSN 0926-6690. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.034>
15. AHMAD, M. R., CHEN, B., ODREJI, S. Y., MOHSAN, M. Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement. *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2018, **173** [žiūrėta 2022-05-03]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.007>
16. AHMAD, M. R., CHEN, B., AMINUL HAQUE, M., ALI SHAH, S. F. Development of a sustainable and innovant hygrothermal bio-composite featuring the enhanced mechanical properties. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2019, **229** [žiūrėta 2022-05-03]. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.002>
17. ARNAUD, L., GOURLAY, E. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2012, **28** [žiūrėta 2022-05-03]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
18. GUPTA, A., CHUDASAMA, B., CHANG B. P., MEKONNEN, T. Robust and sustainable PBAT – Hemp residue biocomposites: Reactive extrusion compatibilization and fabrication. *Composites Science and Technology* [interaktyvus]. 2021, **215** [žiūrėta 2022-05-04]. ISSN 0266-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109014>
19. AVEROUS, L., Digabel, F. L. Properties of biocomposites based on lignocellulosic fillers. *Carbohydrate Polymers* [interaktyvus]. 2006, **66** [žiūrėta 2022-05-04]. ISSN 0144-8617. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.04.004>
20. LI, M., KHELIFA, M., EL GANAOUI, M. Mechanical characterization of concrete containing wood shavings as aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment* [interaktyvus]. 2017, **6** [žiūrėta 2022-05-04]. ISSN 2212-6090. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.12.005>
21. KHEDMATI, M., KIM, Y., TURNER, J. A. Investigation of the interphase between recycled aggregates and cementitious binding materials using integrated microstructural-nanomechanical-chemical characterization. *Composites Part B: Engineering* [interaktyvus]. 2019, **158** [žiūrėta 2022-05-04]. ISSN 1359-8368. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.041>
22. CAMPILHO, R. D. S. G. 10 - Recent innovations in biocomposite products. *Biocomposites for High-Performance Applications: Current Barriers and Future Needs Towards Industrial Development* [interaktyvus]. Woodhead Publishing, 2017 [žiūrėta 2022-05-04]. ISBN 978-0-08-100793-8. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100793-8.00010-7>
23. Arbolitas: sudėtis, veislės, specifikacijos. „Arbolit“: statybinės medžiagos savybės ir paskirtis. Iš ko pagamintas arbolitas. In: *Theroyalfamily*. 2020 [žiūrėta 2022-11-24]. Prieiga per: <https://theroyalfamily.ru/lt/ventilyaciya/arbolit-sostav-raznovidnosti-tehnicheskie-harakteristiki/>

24. ROCKWOOL. *DURISOL Insulated Concrete Forms: Case Study* [PDF]. [n.d.]. [žiūrēta 2022-11-24]. Prieiga per: <https://www.rockwool.com/north-america/advice-and-inspiration/case-studies/durisol-case-study/>
25. DICKER, M. P. M. ir kt. Green composites: A review of material attributes and complementary applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [interaktyvus]. 2014, **56** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 1359-835X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.014>
26. MANU, T. ir kt. Biocomposites: A review of materials and perception. *Materialstoday Communications* [interaktyvus]. 2022, **31** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 2352-4928. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103308>
27. WONSUK, K. ir kt. High strain-rate behavior of natural fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Composite Materials* [interaktyvus]. 2012, **46** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 1530-793X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1177/0021998311414946>
28. DITTENBER, D. B., GANGARAO, H. V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [interaktyvus]. 2012, **43** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 1359-835X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>
29. AZWA, Z. N., YOUSIF, B. F., MANALO, A. C., KARUNASENA, W. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design* [interaktyvus]. 2013, **47** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 0261-3069. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>
30. KAKROODI, A. R., KAZEMI, Y., RODRIGUE, D. Mechanical, rheological, morphological and water absorption properties of maleated polyethylene/hemp composites: Effect of ground tire rubber addition. *Composites Part B: Engineering* [interaktyvus]. 2013, **51** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 1359-8368. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.032>
31. Biocomposite Facade wins JEC Innovation Award. In: *Bioplastics magazine.com* 2015 [žiūrēta 2022-05-05]. Prieiga per: [https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20150227\\_bioBuild.php](https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20150227_bioBuild.php)
32. CARUS, M., EDER, A., BECKMANN, J. GreenPremium Prices Along the Value Chain of Biobased Products. *Industrial Biotechnology* [interaktyvus]. 2014, **10** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 2639-5665. Prieiga per: <http://doi.org/10.1089/ind.2014.1512>
33. SASHRAF, A., FADIEL, M., ABU-LEBDEH, T. Mechanical Properties of Concrete Including Wood Shavings as Fine Aggregates. *American Journal of Engineering and Applied Sciences* [interaktyvus]. 2021, **14** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 1941-7039. Prieiga per: <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2021.478.487>
34. KHEDMATI, M., KIM, Y. R., TURNER, J. A. Investigation of the interphase between recycled aggregates and cementitious binding materials using integrated microstructural-nanomechanical-chemical characterization. *Composites Part B: Engineering* [interaktyvus]. 2019, **158** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 1359-8368. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.041>
35. ALENGARAM, U. J., MUHIT, B. A. A., JUMAAT, M. Z. B. Utilization of oil palm kernel shell as lightweight aggregate in concrete – A review. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2013, **38** [žiūrēta 2022-05-05]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.026>

36. PRUSTY, J. K., PATRO, S. K. Properties of fresh and hardened concrete using agro-waste as partial replacement of coarse aggregate – A review. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2015, **82** [žiūrėta 2022-05-05]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.063>
37. PRETOT, S., COLLET, F., GARNIER, C. Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment* [interaktyvus]. 2014, **72** [žiūrėta 2022-05-05]. ISSN 0360-1323. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.010>
38. BOURDOT, A. ir kt. Characterization of a hemp-based agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties. *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2017, **153** [žiūrėta 2022-05-05]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.022>
39. PANTAWEE, S., SINSIRI, T., JATURAPITAKKUL, C., CHINDAPRASIRTC, P. Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate [Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] and hydrated lime [Ca(OH)<sub>2</sub>] treatment. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, **156** [žiūrėta 2022-05-05]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.181>
40. LIU, M. ir kt. Effect of pectin and hemicellulose removal from hemp fibres on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [interaktyvus]. 2016, **90** [žiūrėta 2022-05-05]. ISSN 0359-835X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.08.037>
41. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-7:2019], *Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis* (EN 12390-7:2019) = *Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete*. Europos standartas EN 12390-7:2019 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.
42. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN ISO 12390-4:2019], *Sukietėjusio betono bandymai. 4 dalis. Gniuždymo stipris. Bandymo mašinų techniniai reikalavimai* (ISO 12390-4:2019) = *Testing hardened concrete – Part 4: Compressive strength – Specification for testing machines*. Europos standartas EN 12390-4:2019 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.
43. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN ISO 10390:2021], *Dirvožemis, apdorotos biologinės atliekos ir dumblas* (ISO 10390:2021) = *Soil, treated biowaste and sludge – Determination of pH*. Europos standartas EN ISO 10390:2021 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2021.