



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Biokompozitų mineralinių rišiklių pagrindu tyrimai

Baigiamasis magistro studijų projektas

Gabrielė Jurgutytė

Projekto autorė

prof. Vitoldas Vaitkevičius

Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Biokompozitų mineralinių rišiklių pagrindu tyrimai

Baigiamasis magistro studijų projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Gabrielė Jurgutytė

Projekto autorė

prof. Vitoldas Vaitkevičius

Vadovas

doc. Evaldas Šerelis

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Gabrielė Jurgutytė

Biokompozitų mineralinių rišiklių pagrindu tyrimai

Akademinių 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.

Gabrielė Jurgutytė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):

BIOKOMPOZITŲ MINERALINIŲ RIŠIKLIŲ PAGRINDU TYRIMAI

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

(lietuvių k.): BIOKOMPOZITŲ MINERALINIŲ RIŠIKLIŲ PAGRINDU TYRIMAI

(anglų k.): RESEARCH ON BIOCOMPOSITES BASED ON MINERAL BINDERS

Pradiniai duomenys darbui:

--

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	x
Analitiniai tyrimai	☐
Skaitiniai tyrimai	☐
Ekonominė dalis	☐
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį):

--

Vadovas:

(indėlis 100 %)

prof. Vitoldas Vaitkevičius

pareigos, vardas, pavardė

Patvirtinta elektroniniu būdu

Konsultantas:

(indėlis _____ %)

pareigos, vardas, pavardė

Konsultantas:

(indėlis _____ %)

pareigos, vardas, pavardė

Studentas:

Gabrielė Jurgutytė

vardas, pavardė

Patvirtinta elektroniniu būdu

Jurgutytė, Gabrielė. Biokompozitų mineralinių rišiklių pagrindu tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Vitoldas Vaitkevičius; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: biokompozitas, pjuvenos, pirolizuota mediena, rišiklis, mechaninės savybės.

Kaunas, 2024. 51 p.

Santrauka

Baigiamojo darbo tyrimo tikslas yra pagaminti biokompozitus su įvairiomis rišamosiomis medžiagomis bei organinėmis atliekomis, kurios prieš naudojimą yra papildomai apdorojamos, ir eksperimento metu nustatyti gautų medžiagų fizikines ir mechanines savybes. Pagrindinės naudojamos rišamosios medžiagos: kalkės ir cementas, organinės atliekos – medienos pjuvenos, pirolizuota mediena.

Darbą sudaro įvadas, literatūros analizė, bandinių sudėtys, gamybos aprašas bei tyrimų metodologija, rezultatai ir išvados.

Atliktoje literatūros analizėje buvo nagrinėjama biokompozito sąvokos reikšmė, skirtingų organinių medžiagų įtaka bandinių mechaninėms, fizikinėms ir šiluminėms savybėms. Taip pat organinių medžiagų papildomo paruošimo įtaka galutiniam gaminiui bei išanalizuotos biokompozitų panaudojimo galimybės.

Sekančiame skyriuje pateikiamos suformuotų biokompozitų sudėtys, gamybos eiga ir tyrimai, kurie buvo atliekami baigiamojo darbo metu.

Atliktas eksperimentas parodė, kad mediena pasižymi labai dideliu vandens įgeriamumu, todėl reikalingas papildomas organinių medžiagų paruošimas prieš ruošiant biokompozito masę. Užpildų analizė naudojant skenuojamąjį elektroninį mikroskopą parodė, kad kontakto zona tarp organinių medžiagų ir rišiklio yra silpna. Presuotų biokompozitų tankis $749\text{--}1263\text{ kg/m}^3$, o betono su organinių medžiagų užpildu – $1500\text{--}1727\text{ kg/m}^3$. Stiprumo gniuždant bandymas parodė, kad organinių medžiagų naudojimas stipriai sumažina biokompozito mechanines savybes.

Išpildžius visus darbo metu iškeltus uždavinius, paskutiniame skyriuje pateikiamos išvados apie atliktą literatūros analizę, papildomo pjuvenų paruošimo įtaką užpildų savybėms, bandinių mechanines ir fizikines savybes ir panaudojimo galimybes.

Baigiamojo magistro darbo apimtis yra 51 puslapis. Rašto darbą sudaro 13 lentelių, 43 paveikslai ir 47 literatūros šaltiniai.

Jurgutytė, Gabrielė. Research on Biocomposites Based on Mineral Binders / supervisor prof. Vitoldas Vaitkevičius; 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, biochar, binder, mechanical properties.

Kaunas, 2024. 51.

Summary

The aim of the final thesis research is to produce biocomposites with various binding materials and organic waste, which are further processed before use, and during the experiment, to determine the physical and mechanical properties of the obtained materials. The main binding materials used are lime and cement, and the organic waste includes wood shavings and pyrolyzed wood.

The thesis consists of an introduction, literature review, sample compositions, production description, research methodology, results, and conclusions. The literature review examined the concept of biocomposite, the influence of different organic materials on the mechanical, physical, and thermal properties of samples, and the impact of additional preparation of organic materials on the final product. The possibilities of using biocomposites were also analyzed.

The following section provides information on the compositions of the formulated biocomposites, the production process, and the experiments conducted during the final thesis. The experiment revealed that wood has a high water absorption capacity, requiring additional preparation of organic materials before making the biocomposite mass. Artificial filler analysis using a scanning electron microscope revealed that the contact zone between organic materials and the binder is weak. The density of compressed biocomposites is in the range of 749–1263 kg/m³, while the density of concrete with organic material filler is 1500–1727 kg/m³. The compressive strength test showed that the use of organic materials significantly reduces the mechanical properties of the biocomposite.

In the final section, conclusions are presented regarding the literature review, the impact of additional preparation on biocomposite properties, the mechanical and physical properties of samples, and potential applications.

The final master's thesis is 51 pages long. The thesis consists of 13 tables, 43 figures, and 47 literature sources.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas	11
1. Literatūros analizė.....	12
1.1. Biokompozitas	12
1.2. Medienos atliekos	13
1.2.1. Organinių medžiagų paruošimas	13
1.2.2. Biokompozito su medienos atliekomis fizikinės savybės	15
1.2.3. Biokompozito su medienos atliekomis mechaninės savybės	16
1.2.4. Biokompozito su medienos atliekomis šiluminės savybės.....	19
1.3. Kanapių spalvai	19
1.3.1. Biokompozito su kanapių spalvais fizikinės savybės.....	20
1.3.2. Biokompozito su kanapių spalvais mechaninės savybės	20
1.3.3. Biokompozito su kanapių spalvais šiluminės savybės	22
1.3.4. Biokompozito su kanapių spalvais akustinės savybės	22
1.4. Panaudojimas.....	23
2. Biokompozitų sudėtys ir tyrimo metodologija.....	26
2.1. Biokompozitų sudėtis ir gamyba	26
2.2. Tyrimo metodologija	27
3. Tyrimo rezultatai ir jų analizė	35
3.1. Medienos pjuvenų vandens absorbcija	35
3.2. Dirbtinių užpildų stipris pagal skalumą.....	35
3.3. Užpildų analizė skenuojamuoju elektroniniu mikroskopu	35
3.4. Dirbtinio užpildo atsparumas šalčiui	37
3.5. Biokompozitų bandinių tankis.....	38
3.6. Biokompozitų gniuždomasis stipris	41
3.7. Biokompozito šiluminės savybės. Šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimas	43
Išvados	47
Literatūros sąrašas	48

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skirtingų medienos rūšių cheminė sudėtis [12].....	13
2 lentelė. Skirtingų medienos rūšių tankis [12].....	15
3 lentelė. Pluoštinės kanapės cheminė sudėtis [11]	20
4 lentelė. Betono su medienos atliekomis sudėtis.....	26
5 lentelė. Presuoto biokompozito su medienos atliekomis sudėtis	26
6 lentelė. Betono su pirolizuota mediena sudėtis	27
7 lentelė. Dirbtiniams užpildams naudojamų mišinių sudėtys, m ³	30
8 lentelė. Dirbtinių užpildų ardomoji apkrova	35
9 lentelė. Elementų kiekis, %.....	37
10 lentelė. Betono su medienos atliekomis tankio rezultatai	38
11 lentelė. Presuoto biokompozito su medienos atliekomis tankio rezultatai	39
12 lentelė. Betono su pirolizuota mediena tankio rezultatas.....	40
13 lentelė. Medžiagų projektinės šilumos laidumo koeficientų vertės	43

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kompozitų klasifikavimas [6].....	12
2 pav. Medienos sudėtis po papildomo apdorojimo [12].....	14
3 pav. Dirbtinis užpildas: a) medienos drožlės sumaišytos su cementu ; b) medienos drožlės sumaišytos su cementu ir emulsikliu [14]	15
4 pav. Vandens įgeriamumo priklausomybė nuo medienos atliekų kiekio sudėtyje [16].....	16
5 pav. Bandinių stiprumo gniuždant rezultatai [18].....	17
6 pav. Bandinių stiprumo lenkiant rezultatai [18].....	17
7 pav. Gniuždomasis stipris (REF - etalonas, WC - medienos drožlės, SD – pjuvenos) [19].....	18
8 pav. Gniuždomasis stipris po ciklų: a) WC25; b) WC20SD5 [19].....	18
9 pav. Lengvo (LWC) ir normalaus (NWC) betono šilumos laidumo bandymo rezultatai [22]	19
10 pav. Stiprumas gniuždant po 7 ir 28 dienų [29].....	21
11 pav. Stiprumas gniuždant karbonizuotų ir nekarbonizuotų bandinių [30].....	22
12 pav. Automobilių durelių vidinis sluoksnis iš biokompozito [38].....	23
13 pav. „Cetris“ plokščių sudėtis [40].....	24
14 pav. „Durisol“ blokelis [42]	24
15 pav. Arbolito blokelis [41]	25
16 pav. Naudotos organinės medžiagos: smulkios ir stambios spygliuočių pjuvenos, pirolizuota mediena.....	26
17 pav. Pjuvenos po džiovinimo – smulkios (kairėje) ir stambios (dešinėje).....	29
18 pav. Granulatorius dirbtinių užpildų gamybai	29
19 pav. Užpildas su per dideliu vandens kiekiu (kairėje), užpildas su reikiamu vandens kiekiu (dešinėje)	30
20 pav. Skenuojamasis elektroninis mikroskopas „Hitachi S-3400N“	31
21 pav. Šildymo–šaldymo kameros rodikliai.....	31
22 pav. Giratorius „Controls“	32
23 pav. Gniuždymo bandymui naudojama mašina „Tony Technik“	34
24 pav. Medienos pjuvenų vandens įgerties rezultatai.....	35
25 pav. Užpildo analizė SEM (x200 didinimas)	36
26 pav. Užpildo analizė SEM (x1500 didinimas)	36
27 pav. Užpildo cheminės analizės vieta (x1500 didinimas).....	37
28 pav. Cheminės mikro-analizės tyrimo rezultatai.....	37
29 pav. Užpildai prieš atsparumo šalčiui bandymą: pjuvenų ir gesintų kalkių užpildas (kairėje), pjuvenų, gesintų kalkių ir portlandcemenčio užpildas (viduryje), pirolizuotos medienos ir gesintų kalkių užpildas (dešinėje)	38
30 pav. Užpildai po atsparumo šalčiui bandymo: pjuvenų ir gesintų kalkių užpildas (kairėje), pjuvenų, gesintų kalkių ir portlandcemenčio užpildas (viduryje), pirolizuotos medienos ir gesintų kalkių užpildas (dešinėje)	38
31 pav. Pjuvenų betono bandinių tankio rezultatų palyginimas	39
32 pav. Presuoto biokompozito su medienos atliekomis tankių palyginimas.....	40
33 pav. Betono su pirolizuota mediena tankių palyginimas	41
34 pav. Betono su medienos atliekomis gniuždomasis stipris	41
35 pav. Presuoto biokompozito su medienos atliekomis gniuždomasis stipris	42
36 pav. Presuoto biokompozito skerspjuvis po gniuždymo bandymo	42
37 pav. Betono su pirolizuota mediena gniuždomasis stipris	43

38 pav. Blokelių maketas	44
39 pav. Blokelių maketo šilumos perdavimo koeficiento U skaičiavimas programa „THERM“	44
40 pav. Realios dydžio blokelių šilumos perdavimo koeficiento U skaičiavimas programa „THERM“	44
41 pav. Realios dydžio blokelių su papildomu termoizoliacijos sluoksniu šilumos perdavimo koeficiento U skaičiavimas programa „THERM“	45
42 pav. Keramzitinio blokelių su termoizoliacijos sluoksniu šilumos perdavimo koeficiento U skaičiavimas programa „THERM“	45
43 pav. Blokelių anglies dioksido emisijos palyginimas	46

Ivadas

Magistro baigiamojo projekto tikslas – pagaminti biokompozitus su organiniais užpildais ir mineraliniais rišikliais bei nustatyti jų fizikines ir mechanines savybes.

Projekto uždaviniai:

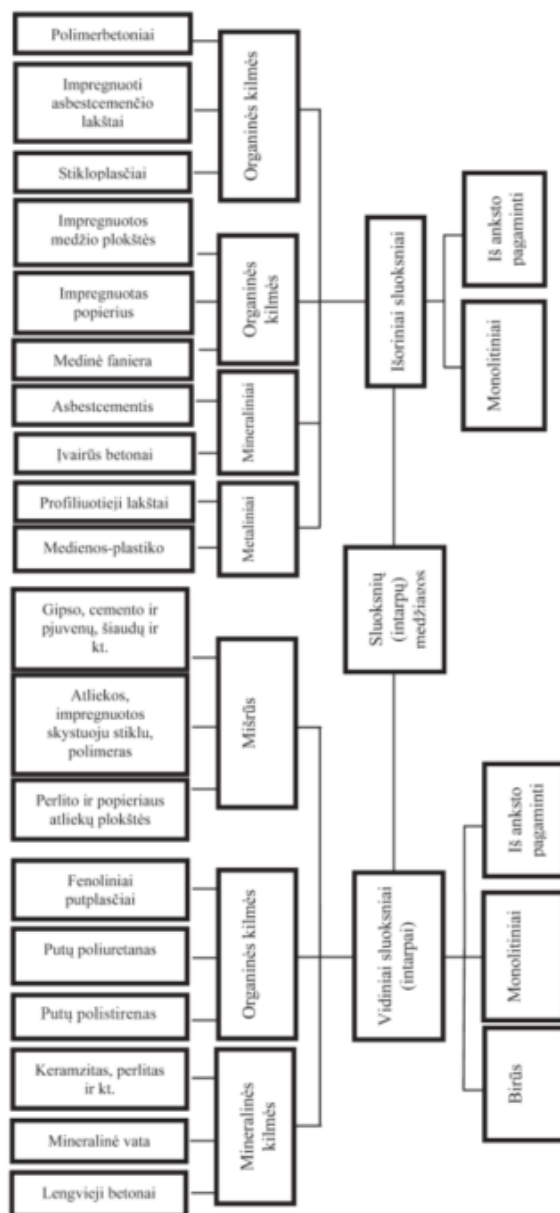
1. Išanalizuoti mokslinius straipsnius ir juos pateikti tematikoje apie biokompozitams naudojamas medžiagas, jų mechanines ir fizikines savybes bei panaudojimą;
2. Pagaminti presuotus biokompozitus su medienos atliekomis ir išnagrinėti jų fizikines ir mechanines savybes;
3. Pagaminti betoną su organiniu užpildu bei išnagrinėti jo fizikines ir mechanines savybes;
4. Nustatyti organinių atliekų papildomo paruošimo įtaką užpildų savybėms;
5. Nustatyti kietinimo anglies dioksido kameroje įtaką biokompozitų savybėms;
6. Palyginti biokompozitinio ir keramzitbetonio blokelių šilumos perdavimo koeficientus.

Pastarąjį dešimtmetį vis garsiau kalbama apie neigiamą šiltnamio efekto poveikį pasauliui. Dėl žmogaus veiklos šiltnamio efekto dujų, tokių kaip vandens garų, anglies dioksido kiekis didėja. Todėl žmonija susiduria su naujomis problemomis, tokiomis kaip tirpstantys ledynai, intensyvėjanti stichinės audros, kylantis vandens lygis. Didelė dalis neigiamą poveikį klimato kaitai darančių dujų išskiriamos statybų pramonėje [1]. Augant žmonių populiacijai auga ir naujos infrastruktūros poreikis. Naujų statinių statybai dažniausiai naudojamas betonas, kuris dėl savo stipruminių savybių bei prieinamos kainos yra antra dažniausiai žmonių naudojama medžiaga po vandens [2]. Betonas gaminamas iš cemento, smulkių bei stambių užpildų bei vandens. Cementui gauti aukštoje temperatūroje kaitinamos klintys. Šio proceso metu į aplinką išskiriama anglies dioksido kiekis sudaro 8 % nuo visų išskiriamų dujų [3]. Taip pat aplinkos ministerija parengė projektą, kurio sąlygos yra, kad nuo 2024 m. organinės medžiagos visuomeniniuose pastatuose turėtų sudaryti 50% viso statinio medžiagų. Siekiant išvengti didelių anglies dioksido dujų kiekio išskyrimo į aplinką bei lagaminti medžiagas, galinčias bent kažkiek prilygti dažniausiai naudojamoms statybinėms medžiagoms kaip betonas, ieškoma alternatyvų. Dėl mažesnio CO₂ pėdsako, didelio prieinamumo, lengvesnio perdirbimo, medžiagų pasirinkimo gausos, biokompozitas tampa vis populiaresnis betono pakaitalas [4].

1. Literatūros analizė

1.1. Biokompozitas

Siekiant sukurti naujas medžiagas, kurios nedarytų neigiamo poveikio aplinkai, kuriamos dviejų ar daugiau skirtingų medžiagų kombinacijos, vadinamos kompozitu [5]. Kompozicinės medžiagos pasižymi tokiais bruožais kaip: sudėtis, jų forma ir medžiagos pasiskirstymas yra suplanuojamas iš anksto, medžiaga sudaryta iš dviejų ar daugiau medžiagų, kurios skiriasi savo chemine sudėtimi ir turi aiškią ribą, medžiagos savybės priklauso nuo kiekvieno iš jos komponentų, medžiaga turi kitokias eksploatacines savybes nei jos sudedamosios dalys. Kompozitą sudaro dvi dalys: užpildai dar kitaip vadinami tarpais ir matrica, kuri apjungia komponentus į vieną visumą. Dažniausiai didžiausią įtaką kompozito savybėms turi užpildai, jų pasiskirstymas. Kompozitai gali būti klasifikuojami pagal užpildų formą: kompozitai su granuliuotais tarpais, kompozitai su plaušiniaisiais tarpais ir sluoksniuotieji kompozitai. Taip pat kompozitai gali būti skirstomi pagal struktūrą, panaudotus užpildus, gamybos būdą (žr. 1 pav.) [6].



1 pav. Kompozitų klasifikavimas [6]

Pastaraisias metais statybų industrija pradeda ieškoti alternatyvų tvirtai rinkoje įsitvirtinusių medžiagų kaip betonas ar plienas pakeitimui, siekiant sumažinti anglies dioksido emisiją. Vienas iš būdų pasiekti šį tikslą yra įtraukti organinių medžiagų, kurios sumažinti šiltnamio efekto keliamą neigiamą poveikį pasauliui. Biokompozito sudėtyje naudojamos tokios organinės medžiagos kaip kanapės, mediena, kviečiai, ryžiai, linų sėmenys ir pan., kurios pakeičia medžiagos fizikines, mechanines ir šilumines savybes [7]. Dėl mažesnio neigiamo poveikio aplinkai, jų gausos ir prieinamumo tokios organinės medžiagos tampa vis populiarsnės biokompozitų gamyboje [4]. Tolimesniuose skyriuose bus aptariami dažniausiai naudojamų organinių užpildų (medienos atliekų ir kanapių spalų) bei mineralinių rišiklių biokompozitų fizikinės, mechaninės, šiluminės savybės bei jų panaudojimas.

1.2. Medienos atliekos

Kiekvienais metais pasaulyje yra iškertami dideli plotai miškų statybinių konstrukcijų ir baldų gamybai. Tačiau didelė dalis šios medienos lieka nepanaudota ir tampa atliekomis, kurių dalis yra perdirbama arba panaudojama kaip kuras, o kita – palieka sąvartynuose supūti. Remiantis aplinkos apsaugos agentūros (EPA) duomenimis, 2018 metais buvo išskirta virš 18 tūkstančių tonų medienos, iš kurių 12 tūkstančių neperdirbta ir palikta sąvartynuose [8]. Neapdirbtos medienos pilnas suirimas gali trukti iki 13 metų. Irimo proceso metu atsiranda grybelis, kuris gali sukelti netoliese esančios augmenijos irimą. Taip pat dideli medienos kiekiai vienoje vietoje kelia didelių gaisrų pavojų. Siekiant sumažinti susidarančių medienos atliekų kiekį, atliekos yra susmulkinamos iki pjuvenų ar drožlių bei gali būti plačiai panaudojamos statybų sektoriuje, siekiant plėtoti tvarią statybą.

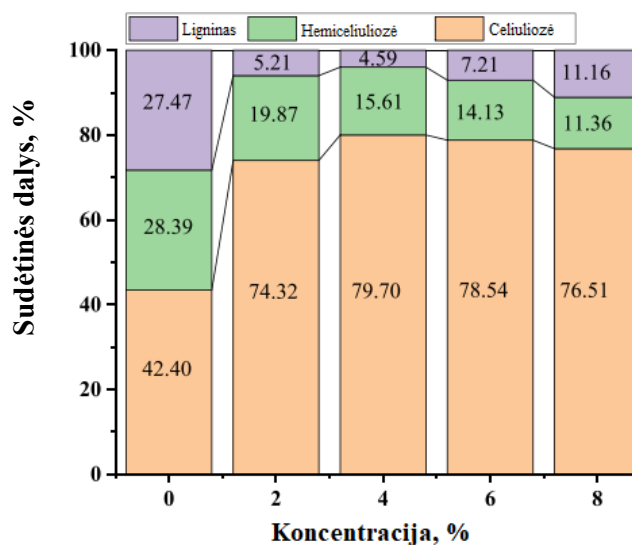
1.2.1. Organinių medžiagų paruošimas

Organinių medžiagų, tokių kaip pjuvenos ir drožlės, kokybė priklauso nuo medienos rūšies. Spygliuočiuose esančios cukringosios ir sakingosios medžiagos neigiamai veikia mineralinių rišiklių kietėjimą. Lapuočių medienoje šių medžiagų yra mažiau, todėl užpildai gaunami geresnės kokybės [9]. Hidratacijos stabdymo mechanizmas yra paremtas absorbcija. Organiniai junginiai absorbuojasi ant trikalcio aluminato ir trikalcio silikato paviršių taip suformuodamos ant dalelių sluoksnį, kuris trukdo patekti vandeniui į jo branduolį. Pagrindiniai junginiai stabdantys cemento hidrataciją yra cukrūs ir dalis hemiceliuliozės. Todėl prieš naudojant organines medžiagas yra svarbu jas papildomai paruošti. Papildomam paruošimui naudojami mineralizatoriai, kurie pagerina cemento matricos ir organinės kilmės medžiagų suderinamumą. Dažniausiai naudojamos gesintos kalkės, aliuminio sulfatas ar skystas stiklas [10].

1 lentelė. Skirtingų medienos rūšių cheminė sudėtis [11]

Rūšis	Celiuliozė, %	Ligninas, %	Hemiceliuliozė		Pelenai, %	Ekstrazinės medžiagos	
			Pentozanai, %	Heksozanai, %		Eteryje	Vandenyje
Eglė,	45,2	29,0	9,3	9,2	0,3	1,5	1,4
Pušis	51,9	20,5	11,2	9,3	0,2	2,6	0,6
Ažuolas	38,9	23,8	22,8	6,3	0,3	4,3	1,8
Beržas	34,1	21,2	22,0	20,0	0,4	1,3	-
Drebulė	52,4	20,3	22,6	0,5	0,2	1,6	2,2
Klevas	41,5	23,1	25,6	7,7	0,3	0,3	0,5
Tuopa	39,8	18,8	23,5	8,3	0,3	6,8	2,1

Autoriai Liu ir kt. [12] atliko bandymą, kurio metu siekė išsiaiškinti, kaip papildomas organinių atliekų paruošimas gali įtakoti galutinio bandinio mechanines savybes. Bandymo metu buvo naudojamos iki 5 mm dydžio susmulkintos medienos drožlės. Kaip mineralizatoriai buvo naudojamos dvi skirtingos medžiagos. Pirmiausiai medžio drožlės buvo kaitinamos 160 °C temperatūros natrio hidroksido tirpale, po 2 valandų nuplautos ir išdžiovintos. Antrasis organinių medžiagų mirkymas buvo atliekamas 95 % vandenilio etanolio tirpale, į kurį dar papildomai buvo dedama silano jungiamojo agento, kuris naudojamas siekiant gerinti medžiagų sąveiką tarp skirtingų paviršių ar medžiagoms, kurios natūraliai nesuderinamos ar turi silpną sąveiką tarpusavyje. Praėjus 3 valandom medžio atliekos buvo išdžiovinamos iki pradinės jų masės. Medienos atliekų sudėtinę dalį pasikeitimas pavaizduotas 2 pav.



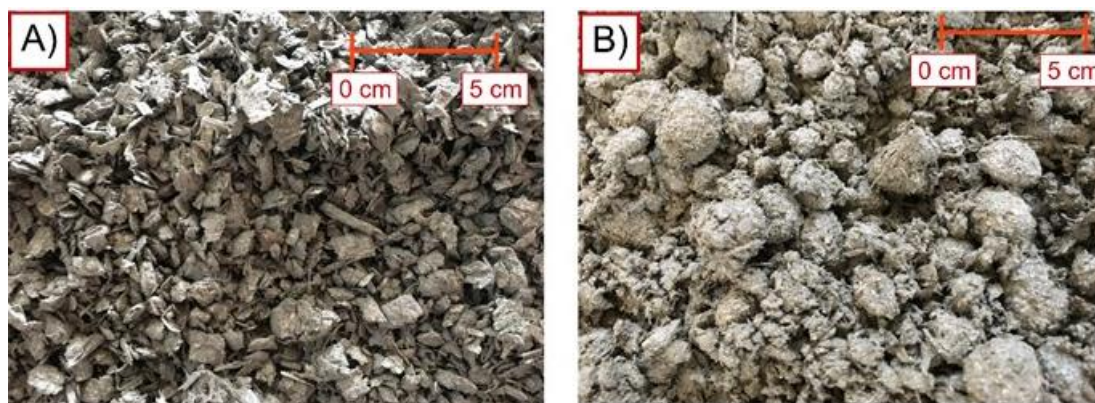
2 pav. Medienos sudėtis po papildomo apdorojimo [12]

Atlikus biokompozitų su papildomai apdorotomis medienos drožlėmis mechaninių savybių tyrimą pastebėta, kad stiprumas gniuždant ir lenkiant padidėjo 28 % ir 27 % lyginant su neapdorotų medienos atliekų biokompozitu.

Taip pat atlikta tyrimų, kurių metu buvo tiriama kaip terminis medienos apdorojimas gali pakeisti gauto bandinio savybes. Autoriai Guo ir kt. [13] atliko tyrimą, kurio metu lygino 3 skirtingai paruoštų biokompozitų mechanines savybes. Buvo naudojamos etaloninės medienos atliekos, be jokio terminio paruošimo, aukštoje temperatūroje (260 °C) valandą kaitintos drožlės ir šiek tiek žemesnėje temperatūroje (220 °C) kaitintos drožlės. Siekiant sužinoti, kaip džiovinimas aukštoje temperatūroje keičia medienos atliekų cheminę sudėtį, buvo naudojama termogravimetrinė analizė, kurios metu sužinota, kad kuo didesnė temperatūra veikia organines medžiagas, tuo daugiau lignino ir hemiceliuliozės pašalinama. Atlikus bandinio struktūros analizę skenuojamuoju elektroniniu mikroskopu pastebėta, kad termiškai apdorotos organinės medžiagos turi šiurkštesni paviršių, kuris pagerins cemento ir medienos suderinamumą.

Autoriai Alrubaie ir kt. [14] bandymo metu siekė ištirti, kaip kinta gniuždymo stipris biokompozito su dirbtiniu užpildu vietoj standartinio stambaus užpildo (skaldos) (žr. 3 pav.). Buvo naudojami kelių tipų dirbtiniai užpildai: drėgnos organinės medžiagos papildomai sumaišytos su cementu, organinės medžiagos sumaišytos su cementu ir emulsikliu. Trečia grupė, kur medienos drožlės papildomai sumaišomos su plytelių klijais ir emulsikliu bei kita grupė, kur emulsiklis nenaudojamas. Gniuždymo

stiprio bandymas parodė, kad betono, kuriame buvo medžio drožlių užpildo, apdoroto cementu, gniuždymo stipris sumažėjo mažiau, palyginti su betonu, pagamintu iš neapdoroto medžio drožlių užpildo, ir betono, pagaminto iš medžio drožlių, apdorotų plytelių klėjais.



3 pav. Dirbtinis užpildas: a) medienos drožlės sumaišytos su cementu ; b) medienos drožlės sumaišytos su cementu ir emulsikliu [14]

Autoriai Siddique ir kt. [15] atliko bandymus su sausomis pjuvenomis ir nustatė, kad neapdirbtos organinės atliekos stipriai sumažina bandinio mechanines savybes. 5 % medienos atliekų sumažina stiprumą gniuždant 32 %, o 10 % – 72 %. Siekiant pagerinti stiprumą, atlikti bandymai panaudojant parą vandenyje mirkytas pjuvenas. Bandinio su 5 % organinių atliekų stiprumas gniuždant buvo panašus į kontrolinio bandinio, tačiau 10 % drėgnų organinių medžiagų stipriai sumažina stiprumą. Bandant pasiekti dar geresnes mechanines savybes, kituose bandiniuose naudotos pjuvenos mirkytos natrio silikate. Rezultatai parodė, kad cheminiame tirpale mirkytos medienos atliekos kompozitui suteikia geresnes mechanines savybes, nei drėkinimas vandenyje.

1.2.2. Biokompozito su medienos atliekomis fizikinės savybės

Tankis

Viena svarbiausių medienos savybių yra tankis. Priklausomai nuo medienos rūšies ir drėgnumo tankis gali kisti nuo 350 iki 650 kg/m³ (žr. 2 lentelę) [11].

2 lentelė. Skirtingų medienos rūšių tankis [11]

Medienos rūšis	Vikmedis	Ažuolas	Uosis	Maumedis	Beržas	Pušis	Liepa	Eglė	Kėnis
Tankis, kg/m ³	650	570	560	540	520	415	400	365	350

Tradicinio normalaus betono tankis svyruoja nuo 2000 iki 2600 kg/m³. Mišinio tankis daugiausiai priklauso nuo užpildų tankio [9]. Kadangi medienos atliekų tankis yra mažesnis nei betono sudėtyje esančių užpildų, gauto biokompozito tankis yra mažesnis nei etaloninio bandinio.

Abed ir kt. [16] atliko bandymą, kurio metu nustatinėjo, kaip kinta biokompozito savybės, kai medienos atliekos pakeičia 10–30 % cemento arba 10–30 % smulkaus užpildo, arba 10–30 % stambaus užpildo. Tyrimo metu nustatyta, kad labiausiai tankis mažėja, kai cementas yra pakeičiamas organinėmis medžiagomis. Didinant medienos atliekų kiekį, mažėja bandinių tankis nuo 2300 kg/m³, kai 10 % medienos atliekų, iki 1733 kg/m³.

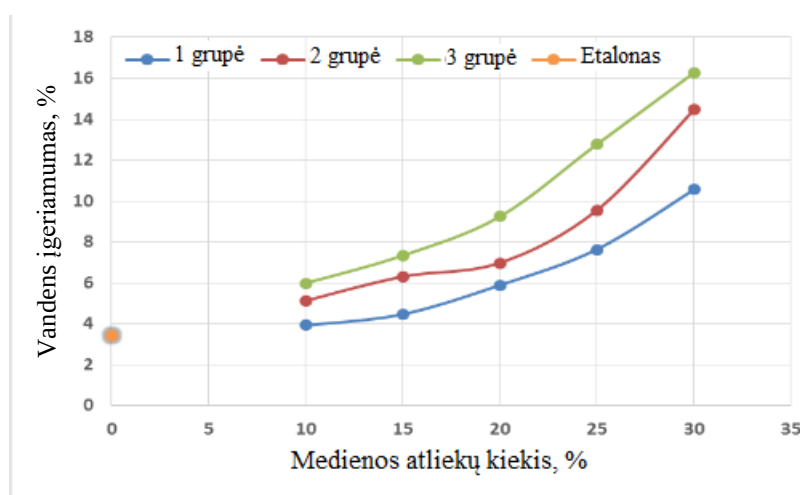
Awal ir kt. [17] tyrimo metu buvo pagaminti 3 skirtingų sudėčių cemento ir smulkių medienos atliekų bandiniai, kur medžiagų santykis 1:1, 1:2 ir 1:3. Po 28 dienų nustatytas bandinių tankis parodė, kad mišinio santykis 1:1 leidžia sumažinti tankį apie 40 % (1450 kg/m^3). Šie rezultatai išryškina pjuvenų betono galimybes naudoti kaip lengvąjį betoną.

Vandens įgeriamumas

Kita svarbi medienos savybė yra vandens įgeriamumas. Mediena yra higroskopinė medžiaga, kuri gali sugerti ir išskirti į aplinką vandenį priklausomai nuo aplinkos drėgmės lygio. Šios savybės gali įtakoti medienos tankį ir tūrį. Dėl atsiradusios papildomos drėgmės ar jos išgaravimo, mediena brinksta arba traukiasi, o tai gali sukelti papildomas deformacijas ar pleišėjimą [11]. Organinių medžiagų vandens įgeriamumas yra viena didžiausių problemų, dėl kurios biokompozitas turi prastesnes savybes. Medienos atliekos sugeria kompozito mišinyje esantį vandenį, kuris reikalingas cemento hidratacijai. Todėl betonui su medienos atliekų užpildu reikalingas didesnis vandens kiekis, kuris mažina bandinio stiprumą.

Awal ir kt. [17] tyrimo metu didinant cemento ir pjuvenų santykį nuo 1:1 iki 1:3, vandens įgeriamumas padidėjo nuo 13 % iki 19 %.

Iš Abed ir kt. [16] atlikto bandymo rezultatų (žr. 4 pav.) matoma, kad vandens įgeriamumas proporcingai didėja, didinant organinių medžiagų kiekį bandiniuose.



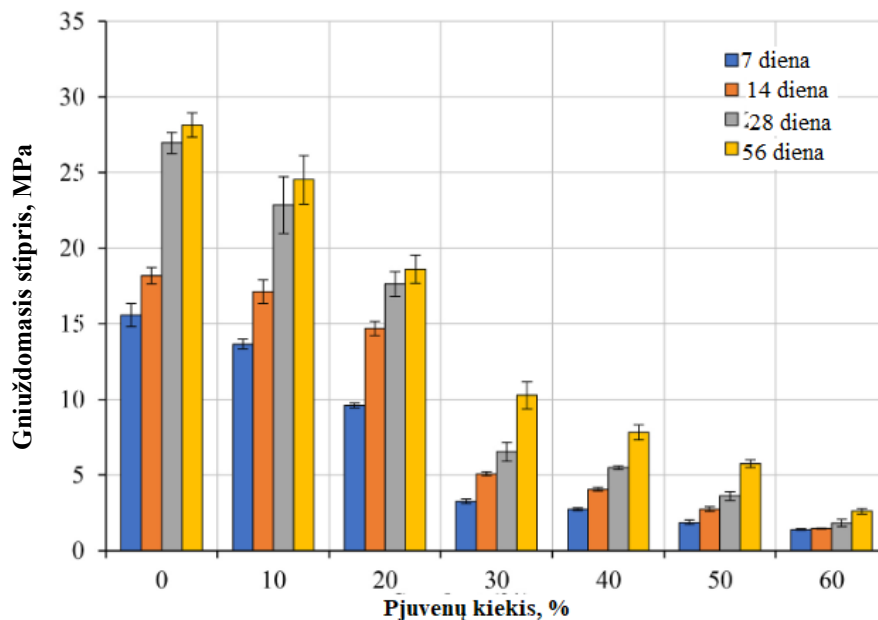
4 pav. Vandens įgeriamumo priklausomybė nuo medienos atliekų kiekio sudėtyje [16]

1.2.3. Biokompozito su medienos atliekomis mechaninės savybės

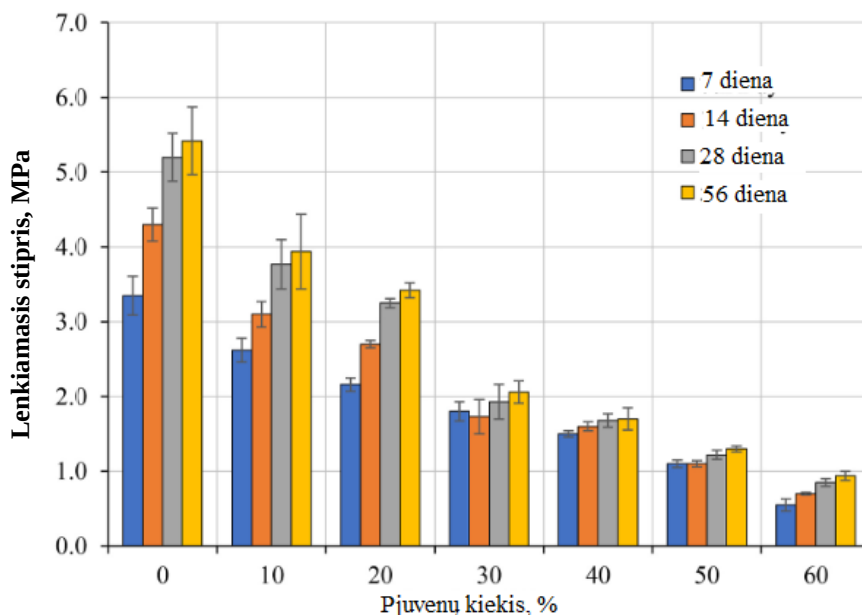
Dėl savo gerų mechaninių savybių, ypač stiprumo gniuždant, betonas išlieka viena labiausiai naudojamų statybinių medžiagų pasaulyje, tačiau siekiant mažinti anglies dioksido dujų emisiją, bandoma rasti naujų medžiagų, kurios pagal mechanines savybes nebūtų daug silpnesnės už betoną ir CO₂ išskyrimas į aplinką būtų mažesnis.

Autoriai Batool'as ir kt. [18] atliko bandymą, kur naudojamos papildomai neapdirbtos, ore džiovintos pjuvenos vietoj smulkaus užpildo. Iš viso buvo pagaminti 7 skirtingų sudėčių bandinių grupės: etalonas, skirtas palyginimui kaip kinta savybės priklausomai nuo organinio užpildo kiekio ir 6 biokompozitai su kintančių organinių atliekų kiekiu nuo 10 % iki 60 %. Stiprumo gniuždant bandymas parodė, kad biokompozitų stiprumas, lyginant su kontroliniu bandiniu yra mažesnis ir vis

mažėja didinant organinių medžiagų kiekį sudėtyje. Pastebėta, kad 10 % smulkaus užpildo pakeitus medienos atliekomis stiprumas sumažėja ne tiek daug, kaip biokompozitų su 20–60 % organinio užpildo (žr. 5 pav.) Taip pat atlikus stiprumo lenkiant bandymą nustatyta, kad dėl silpno cemento ir organinių medžiagų suderinamumo didėjant pjuvenų kiekiui sudėtyje, stipris lenkiant mažėja. Kuo didesnis kiekis organinių medžiagų, tuo stiprumas lenkiant mažėja sparčiau (žr. 6 pav.).



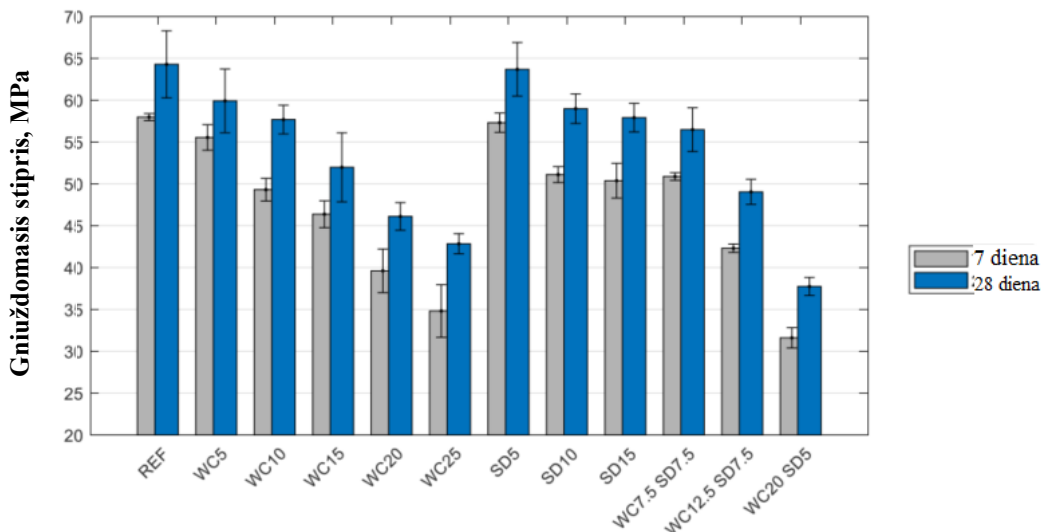
5 pav. Bandinių stiprumo gniuždant rezultatai [18]



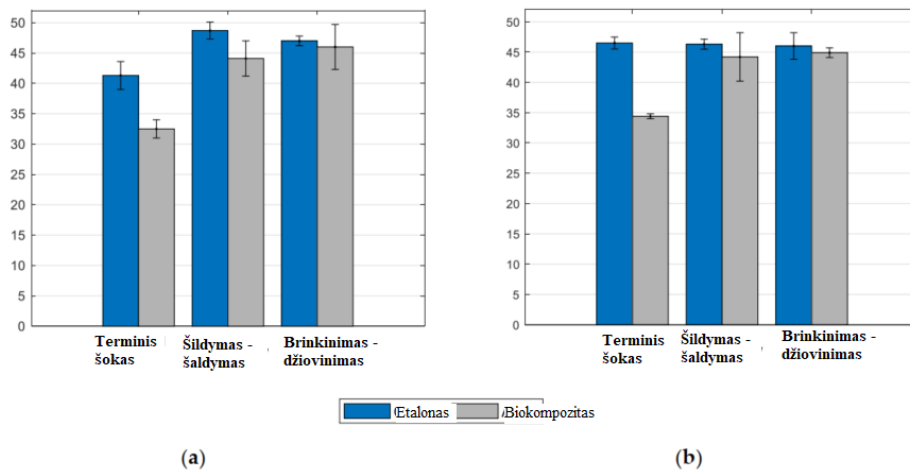
6 pav. Bandinių stiprumo lenkiant rezultatai [18]

Dias ir kt. [19] bandė sukurti biokompozitą, kurio tankis būtų mažesnis nei 2125 kg/m^3 , stiprumas gniuždant viršytų 25 MPa ir sudėtyje būtų kuo didesnė dalis medienos. Išlaikant vandens ir cemento santykį 0,4 buvo pagaminti bandiniai, kur kaip užpildas naudojama nuo 5 % iki 25 % medienos drožlių arba nuo 5 % iki 15 % pjuvenų, arba nuo 15 % iki 25 % medienos drožlių ir pjuvenų. Kaip ir kitų mokslininkų atliktuose tyrimuose, rezultatai parodė, kad didėjant organinių medžiagų kiekiui,

stiprumas mažėja, tačiau pastebėta, kad priklausomai nuo organinių medžiagų frakcijos dydžio, stiprumas kinta skirtingai (žr. 7 pav.). Pakeitus 5 % smulkaus užpildo medienos drožlėmis, stiprumas gniuždant sumažėja apie 7 %, o pakeitus tą patį kiekį pjuvenomis stiprumo sumažėjimas yra 1 %. Taip pat dviejų tipų biokompozitų: vieno su 25 % medienos drožlių, antro – su 25 % pjuvenų ir medienos drožlių, stiprumas gniuždant buvo patikrintas po terminio šoko, brinkinimo – džiovinimo ir šaldymo – šildymo ciklų. Pagal rezultatus nustatyta, kad labiausiai bandinio stiprumas sumažėja po terminio šoko ciklų (žr. 8 pav.). Atlikus biokompozito lenkiamojo stiprumo bandymą, nustatyta, kad labiausiai stiprumas sumažėja, kai sudėtyje yra 25 % organinių atliekų.



7 pav. Gniuždomasis stipris (REF - etalonas, WC - medienos drožlės, SD – pjuvenos) [19]



8 pav. Gniuždomasis stipris po ciklų: a) WC25; b) WC20SD5 [19]

Autoriai Wei ir kt. [20] atliko bandymą, kurio metu nustatinėjo, kaip skirtingo cemento naudojimas keičia kompozito mechanines savybes. Tyrimo metu naudojamas plačiausiai naudojamas portlandcementis ir magnezinis cementas, kurio sudėtyje yra magnio oksidų. Magnezinis cementas yra orinė rišamoji medžiaga, kuri kietėja sumaišyta su magnio chloridu ar sulfatu. Bandiniai su magneziniu cementu yra stiprūs gniuždant, nedilūs, bet neatsparūs drėgmei. Kaip užpildas šiame tyrime naudojamos pušies pjuvenos. Iš viso pagaminti 6 skirtingų sudėčių kompozitai su magneziniu cementu, kur organinio užpildo kiekis kinta nuo 10 iki 70 % bei 2 kompozitai su portlandcementu, kur medienos atliekų yra 50 arba 60 %. Bandymo gniuždant ir lenkiant rezultatai parodė, kad tiek

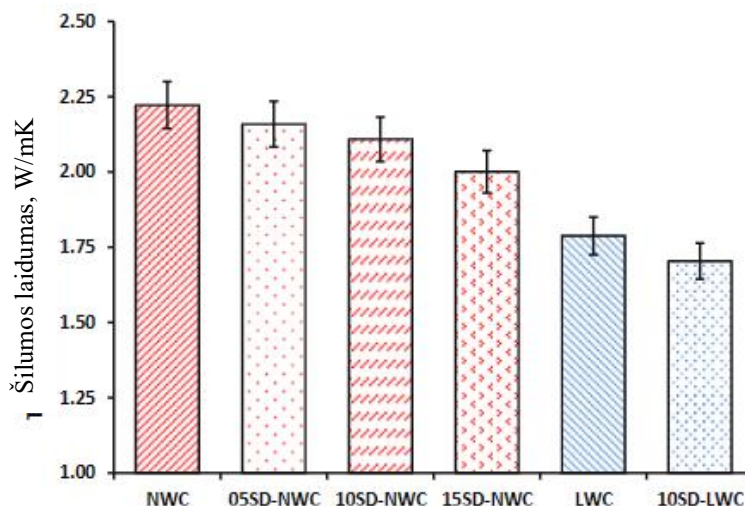
gniuždomasis, tiek lenkiamasis bandinių stipris mažėja, kai didinamas organinių medžiagų kiekis nepriklausomai koks rišiklis naudojamas. Tačiau nustatyta, kad magnezinio rišiklio naudojimas suteikia kompozitui geresnes mechanines savybes.

1.2.4. Biokompozito su medienos atliekomis šiluminės savybės

Šilumos laidumas yra vieną pagrindinių medžiagų savybių, kuri yra būtina siekiant užtikrinti kuo enegiškai efektyvesnių pastatų statybą. Betono šilumos laidumas yra 0,42 W/mK, o medienos priklausomai nuo rūšies svyruoja nuo 0,1 iki 0,2 W/mK. Pjuvenų šilumos laidumas yra 0,08 W/mK. Kadangi betonas nepasižymi geromis termoizoliacinėmis savybėmis, atliekami bandymai siekiant sužinoti, kaip medžiagos su geresniu šilumos laidumu įtraukimas į bendrą mišinį keičia kompozito šilumines savybes.

Madrid ir kt. [21] atlikto tyrimo metu, kai iš biokompozito buvo gaminami betoniniai blokeliai sienoms įrengti, nustatė, kaip didėjantis organinių medžiagų kiekis keičia medžiagos šiluminį laidumą. Buvo pagamintos 3 skirtingų medžiagiškumų sienos, kurios tarpusavyje lyginamos. Pirmoji palyginimui buvo gaminama iš standartinių medžiagų, antroji 5 % mišinio tūryje esančio smulkaus užpildo pakeičiant pjuvenomis ir trečioji, kur 5 % ir 15 % smulkaus užpildo ir cemento buvo pakeičiam organinėmis medžiagomis. Atlikus bandymą nustatyta, kad etalono šilumos laidumas 0,699 W/mK, antros bandomosios sienos – 0,601 W/mK, trečiosios – 0,643 W/mK.

Wisal ir kt. [22] atlikto bandymo metu buvo tyrinėjami normalaus ir lengvo svorio betonai su skirtingu kiekiu organinių medžiagų, kurios pakeitė dalį sudėtyje esančio smulkaus užpildo. Normalaus betono bandiniai buvo bandomi su 0, 5, 10 ir 15 % pjuvenų, o lengvasis betonas su 0 ir 10% medienos atliekų. Šilumos laidumo bandymo metu nustatyta, kad tiek normalaus, tiek lengvo betono šiluminis laidumas mažėja didinant organinių medžiagų kiekį sudėtyje (žr. 9 pav.).



9 pav. Lengvo (LWC) ir normalaus (NWC) betono šilumos laidumo bandymo rezultatai [22]

1.3. Kanapių spaliai

Kanapės yra vienas seniausių žmonių auginamų augalų tekstilės gamybai. Šis augalas išsiskiria savo augimo greičiu, per 100 dienų gali užaugti iki 4 metrų aukščio. Šios medžiagos auginimui nereikia

pesticidų ar herbicidų. Nustatyta, kad 1 tona kanapių pluošto susikaupia apie 500 kg anglies. Taip pat į atmosferą patenka 2 tonomis mažiau anglies dvideginio [23]. Kanapių spaliai gaunami perdurbant kanapių stiebelius į pluoštą. Kanapių spaliai yra netaisyklingos formos dalelių pavidalo, kurių ilgis yra 10–70 mm, o plotis 2–2,5 mm. Priklausomai nuo augalo rūšies, kanapės stiebas susideda iš 20–40 % pluošto ir 60–80 % medienos (spalių). Pluoštinių kanapių cheminė sudėtis yra panaši į kitų organinių medžiagų (žr. 3 lentelę) [10].

3 lentelė. Pluoštinės kanapės cheminė sudėtis [10]

Komponentas	Stiebas	Pluoštas	Spalis
Celiuliozė	59-67	60-67	40-52
Ligninas	-	13-14	22-30
Hemiceliuliozė	-	16	-
Pektinai	-	-	1
Riebalai ir dervos	-	0,7	0,5-1,4

1.3.1. Biokompozito su kanapių spaliais fizikinės savybės

Tankis

Kanapių spalių tankis yra daug mažesnis nei tradicinio betono elementų tankis. Piltinis šios medžiagos tankis yra 100–120 kg/m³. Biokompozito su kanapių spaliais tankis labiausiai priklauso nuo organinių medžiagų kiekio, frakcijos dydžio ir poringumo. Dažniausiai kompozito tankis svyruoja nuo 400 iki 500 kg/m³, jei mišinys yra pilamas statybvietėje [24].

Sassoni ir kt. [25] bandymo metu pagamino 5 skirtingų tankių (330, 640, 1025, 1210, 1280 kg/m³) biokompozitines plokštes ir stebėjo kaip kinta kitos medžiagos savybės priklausomai nuo bandinio tankio. Tyrimo rezultatai parodė, kad didėjant medžiagos tankiui, didėja kompozito šilumos laidumo koeficientas. Taip pat didesnis tankumas suteikia bandiniu didesnę stiprumą gniuždant.

Vandens įgeriamumas

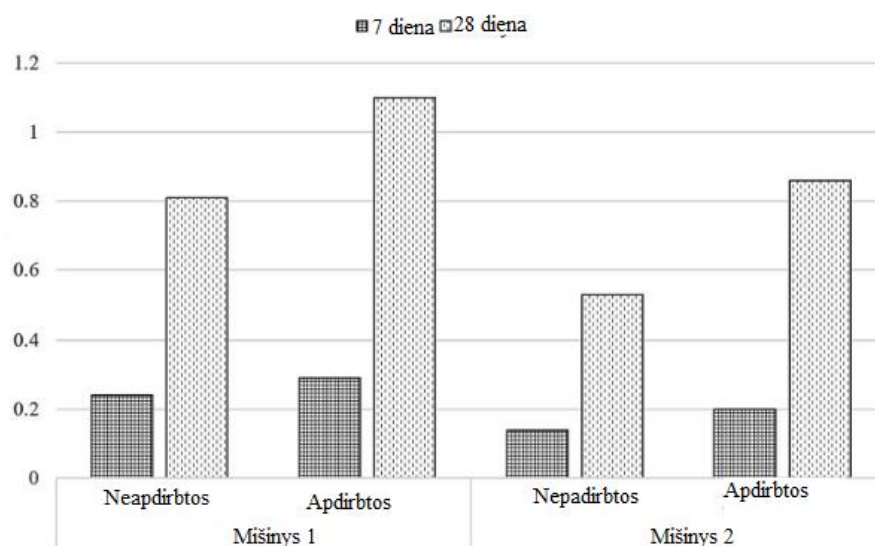
Kanapių spalių biokompozito kaip ir kitų organinių medžiagų turinčių kompozitų vandens įgeriamumas yra didelis dėl didelio medžiagų poringumo. Walker ir kt. [26] atliktas tyrimas parodė, kad vandens įgeriamumas pradžioje bandymo yra didelis ir laikui einant mažėja. Pastebėta, kad vandens įgeriamumas priklauso nuo rišiklio tipo. Hidraulinių rišiklių didesnis kiekis sudėtyje mažina medžiagų vandens įgeriamumą.

1.3.2. Biokompozito su kanapių spaliais mechaninės savybės

Viena pagrindinių statybinių konstrukcijų savybių, nuo kurios priklauso statinio patikimumas yra stiprumas gniuždant. Biokompozito su kanapių betonu mechaninės savybės, lyginant su kitų tipų biokompozitais, yra prastos dėl jų poringumo. Kompozito su kanapėmis ir kalkėmis (400 kg/m³) poringumas gali siekti 70 % [27].

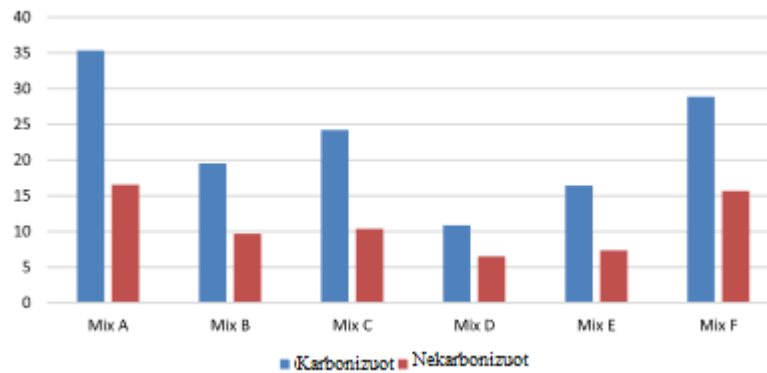
Del Valle-Zermeno ir kt. [28] atliktas bandymas, kurio metu pagaminti 5 skirtingų sudėčių biokompozitai (0 %, 8 %, 12 %, 16 % ir 20 % kanapių spalių sudėtyje) ir patikrintas jų stiprumas gniuždant. Rezultatai parodė, kad bandinio su mažiausia procentine dalimi organinių medžiagų sudėtyje stiprumas yra 73 % mažesnis už etalono stiprumą, o bandinio su didžiausia procentine dalimi kanapių spalių sudėtyje stiprumas nesiekia nei 0,5 MPa.

Al-Kheetan [29] siekdamas pagerinti organinių medžiagų ir cemento suderinamumą, atliko papildomą kanapių spalių paruošimą. Augalinė medžiaga buvo 30 minučių verdama ir po to dar pusvalandį laikoma garuose. Iš paruoštų kanapių pagaminti dviejų skirtingų sudėčių mišiniai. Pirmajame mišinyje visas smulkus užpildas buvo pakeičiamas kanapių spaliais, antrajame – 0,3 smulkaus užpildo pakeista organinėmis medžiagomis. Stiprumo gniuždant bandymas parodė, kad tiek pirmo, tiek antro mišinio stiprumas pagerėjo, kai naudojamos karštu vandeniu ir garais papildomai apdorotos organinės medžiagos. Taip pat iš rezultatų nustatyta, kad viso smulkaus užpildo pakeitimas kanapių spaliais suteikia bandiniui didesnę stiprumą (žr. 10 pav.).



10 pav. Stiprumas gniuždant po 7 ir 28 dienų [29]

Stella Mary ir kt. [30] atliko bandymą, kurio metu siekė išsiaiškinti kaip skirtingi rišikliai ir kietinimas CO_2 kameroje pakeičia biokompozito stiprumą gniuždant. Kanapių spaliai prieš maišant juos į bendrą mišinį buvo papildomai apdoroti: 2 paras laikomi užmerkti į natrio hidroksido tirpalą po to nuplauti ir išdžiovinti. Kaip rišikliai buvo naudojamos hidraulinės kalkės, aukštakrosnių šlakas, cementas, aliuminio silikatas, lakieji pelenai ir silicio dioksido dulkės. Išformuoti bandiniai 2 paras buvo laikomi karbonizacijos kameroje. Po priverstinio karbonizavimo nustatyta, kad bandinių svoris padidėjo, dėl bandinio viduje esančių porų prisotinimo anglies dioksido dujomis. Atliktas stiprumo gniuždant bandymas parodė, kad bandinių kietinimas CO_2 kameroje pagerina biokompozito stiprumą beveik 2 kartus (žr. 11 pav.). Taip pat nustatyta, kad didžiausią stiprumą bandinys pasiekia, kai rišikliui naudojamos kalkės (karbonizuoto – 35 MPa, nekarbonizuoto – 17 MPa), mažiausią – naudojant cementą ir kalkes (karbonizuoto – 11 MPa, nekarbonizuoto – 7 MPa).



11 pav. Stiprumas gniuždant karbonizuotų ir nekarbonizuotų bandinių [30]

Autoriai Benfratello ir kt. [31] atliko bandymą, kurio metu gamino skirtingų sudėčių kanapių kompozitą siekiant pagaminti lengvą betoną. Kaip rišiklis buvo naudojamos kalkės. Stiprumo gniuždant bandymas buvo atliktas 10 skirtingų bandinių, kurių tankis svyravo nuo 300 iki 600 kg/m³. Atliekant mišinių maišymą pastebėta, kad užpildas didesnis nei 4 mm skersmens yra per didelis, taip pat didžiausia galima organinės medžiagos dalis bandinyje yra 30–40 %. Stiprumo bandymo metu nustatyta, kad kanapių spaliai suteikia bandiniams didesnę plastiškumą, o stiprumas didinant organinių medžiagų kiekį mažėja nuo 0,46 MPa iki 0,044 MPa. Atliktas lenkimo bandymas parodė, kad lenkiamasis stipris tokių kompozitų svyruoja nuo 0,08 MPa iki 0,141 MPa. Tai priklauso nuo organinių medžiagų kiekio bandinyje ir bandinio defektų.

Autoriai Saez-Perez ir kt. [27] teigia, kad nors kompozito mechaninės savybės labiausiai priklauso nuo organinio užpildo poringumo, yra daugybė būdų, kaip pagerinti bandinio stiprumą. Vienas tvariausių būdų yra papildomas betono su organinėmis atliekomis sutankinimas taip sumažinant porų tūrį. Poringumas taip pat gali būti sumažinamas į mišinį dedant smulkesnės frakcijos priedus. Tai padidina bandinio stiprumą, tačiau tuomet reikalingas didesnis rišiklio kiekis mišinyje. Kalkių su didesniu pucolaninių junginių kiekiu naudojimas taip pat rodo geresnius kompozito stiprumo bandymo rezultatus.

1.3.3. Biokompozito su kanapių spaliais šiluminės savybės

Kompozitas su kanapių spalio užpildu dėl mažo tankio ir didelio poringumo pasižymi geromis šiluminėmis savybėmis, kurios labiausiai priklauso nuo tankumo ir vandens kiekio.

Autoriai Gourlay ir kt. [32] atliko bandymą su tikslu išsiaiškinti, kaip vandens kiekis įtakoja šilumines biokompozito savybes. Tyrimo metu nustatyta, kad bandinio šilumos laidumas didėja proporcingai didėjant vandens kiekiui mišinyje.

Autoriai Collet ir kt. [33] atliko bandymą siekiant išsiaiškinti kaip vandens kiekis ir bandinio tankumas gali paveikti šilumines kompozito savybes. Bandymo rezultatai parodė, kad tankio įtaka medžiagos šilumos laidumui yra daug didesnė nei drėgmės kiekio. Padidėjus bandinio tankiui 67 %, šilumos laidumas padidėjo 54 %, tačiau santykinį drėgnumą nuo sausos būsenos padidinus iki 90 %, šiluminis laidumas padidėjo ne daugiau kaip 15–20 %.

1.3.4. Biokompozito su kanapių spaliais akustinės savybės

Kompozito su organiniu užpildu akustinės savybės yra geresnės nei įprasto portlandcemento betono. Autoriai Kinnane ir kt. [34] įrodė, kad fizikinės savybės, tokios kaip tankis ar poringumas, ne tiek

daug įtakoja kanapių betono akustinės savybės, kaip cheminė sudėtis. Taip pat nustatyta, kad kompozito su kalkėmis ir pucolaniniais rišikliais akustinės savybės yra geresnės nei kompozito su hidraulinėmis kalkėmis.

Autoriai Degrave-Lemeurs ir kt. [35] atliko bandymą, kurio metu siekė sužinoti kaip skirtingų rišiklių naudojimas keičia kompozito akustinės savybės. Tyrime kaip rišiklis buvo naudojamos kalkės ir molis. Rezultatai parodė, kad tiek naudojant hidraulinės kalkes, tiek molį kompozito akustinės savybės yra panašios. Garso izoliaciniai rodikliai priklauso nuo bandinių tankio: jei tankis yra mažiau nei 375 kg/m^3 tai garso izoliacijos rodiklis svyruoja nuo 0,6 iki 1,0, jei tankis svyruoja nuo 375 iki 500 kg/m^3 , tai koeficiento kitimo amplitudė 0,3–0,8. Kai tankis jau viršija 500 kg/m^3 , garso izoliacijos koeficientas nebekinta ir toliau didėjant tankiui, garso izoliacija mažėja.

1.4. Panaudojimas

Tvarumo sąvoka tampa vis populiareesnė ir svarbesnė įvairiose gamybos pramonės srityse. Todėl biokompozito panaudojimo galimybės vis plečiasi, siekiant sukurti ekologiškus ir kuo mažiau neigiamą poveikį aplinkai turinčius produktus. Ši medžiaga pranašesnė už kitas tokiomis savybėmis kaip lengvas perdurbimas, mažas tankis bei prieinama kaina [36]. Kompozito su organiniais užpildais panaudojimas statybų, aviacijos ir kosmoso pramonėje, automobilių gamyboje, pakavimo industrijoje sparčiai plečiasi [37].

Automobilių pramonėje biokompozitas naudojamas siekiant pagerinti automobilių našumą, mažinti svorį ir poveikį aplinkai. Iš biokompozitinių medžiagų gali būti gaminamos vidinės apdailos detalės, pavyzdžiui skydeliai, durų ar sėdynių apmušalai. Taip pat siekiant automobilį padaryti kuo lengvesnį išorinės detalės, tokios kaip automobilio dėžė, panelės gali būti gaminamos iš kanapių ar linų pluošto sumaišyto su polimeriniais junginiais [38]. Dėl gerų termoizoliacinių savybių, biokompozitas naudojamas ir kaip izoliacinė medžiaga duryse, siekiant sumažinti automobilio šilumos perdavimą.



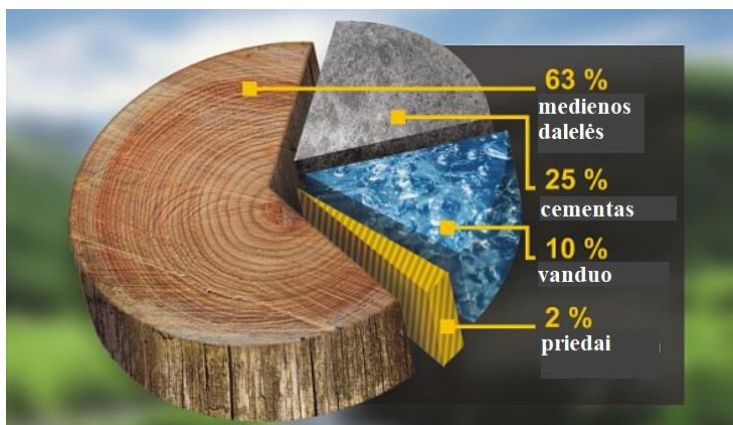
12 pav. Automobilių durelių vidinis sluoksnis iš biokompozito [38]

Aviacijos ir kosmoso pramonėje biokompozitas naudojamas, siekiant sumažinti konstrukcijų svorį, anglies dioksido pėdsaką ir gaminti tvaresnius elementus. Panašiai kaip ir automobilių pramonėje, aviacijoje iš biokompozito gaminami įvairūs dangteliai, panelės, sėdynių apsaugos korpusai. Taip pat naudojama kaip šilumos ar garso izoliacija lėktuvų ir kitų oro pramonės įrenginių viduje [39].

Pakavimo industrijoje biokompozitas vis dažniau naudojamas kaip alternatyva pakeičiant plastiką ar kartoną. Kompozitas iš natūralaus pluošto ar bioplastikų naudojamas gaminant vienkartinius indus, maišelius. Taip pat medienos pjuvenų ar bioplastikų kompozitai naudojami kaip pakavimo užpildai,

apsaugantys transportavimo metu. Tokios medžiagos natūraliai suyra aplinkoje ir nekelia didelio pavojaus aplinkai.

Biokompozitas su medžio atliekų užpildu dėl nedidelių stipruminių savybių labiau naudojamas kaip apdailinių ar nelaikančiųjų konstrukcijų medžiaga. Vienas iš populiariesnių tokio organinio kompozito panaudojimo būdų yra fasadinės plokštės, kurių sudėtyje yra virš 60 % medienos drožlių. Tokios plokštės yra lengvesnės nei tradicinės cemento pluošto konstrukcijos. Savo tvirtumo, atsparumu atmosferos poveikiams bei grybeliui nenusileidžia cemento ar gipso kartono plokštėms [40].



13 pav. „Cetris“ plokščių sudėtis [40]

Taip pat statybos industrijoje naudojami biokompozitiniai „Durisol“ (žr. 14 pav.) ir arbolito (žr. 15 pav.) blokeliai. „Durisol“ blokeliai gaminami iš medienos (eglių) skiedrų, kurios yra mineralizuojamos ir sumaišomos su portlandcemenčiu, kurio sudėtyje yra tik 2 %. Šie blokeliai pasižymi geromis termoizoliacinėmis savybėmis, todėl nereikalingas išorinių atitvarų papildomas apšiltinimas. 90 % blokelių sudaro mediena, todėl tai yra natūrali medžiaga, neturinti didelio neigiamo poveikio aplinkai. „Durisol“ yra nedegi medžiaga, pasiekia ugniaatsparumo klasę REI 180, galima statyti pastatus iki 20 aukštų [41]. Arbolito blokeliai, kaip ir „Durisol“ gaminami iš spygliuočių medienos atliekų ir portlandcemenčio. Gali būti naudojami kaip termoizoliacinė ar konstrukcinė medžiaga mažaukščių pastatų statybai. Blokelių tankis gali būti 400–850 kg/m³, šilumos laidumas yra 0,08–0,17 W/m°C. Nors blokelių daugiausiai sudaro organinės medžiagos, jis atsparus mikroorganizmų poveikiui [42].



14 pav. „Durisol“ blokelis [42]



15 pav. Arbolito blokelis [41]

Biokompozitas su kanapių spalių užpildu gali būti naudojamas sienų, grindų ir stogo konstrukcijų gamybai. Biokompozitas gali būti purškiamas vietoje, monolitinamas arba pagaminamas gamykloje ir atvežamas į aikštelę kaip surenkamas gaminys. Dėl prastų mechaninių savybių kanapių betonas negali būti naudojamas kaip laikančiųjų konstrukcijų medžiaga. Dažniausiai kompozitas naudojamas kaip užpildomasis sluoksnis mediniame karkase. Kanapių spalių blokeliai yra naudojami dėl patogaus ir greito montavimo statybvietyje bei sumažintų atliekų kiekio statybų aikštelėje. Dėl gerų termoizoliacinių savybių kanapių betonas puikiai tinka ir grindų konstrukcijai. Grindų storis dažniausiai yra mažesnis nei dažniausiai naudojamų betoninių grindų, reikalingas mažesnis kiekis izoliacinių medžiagų, todėl atliekama mažiau kasimo darbų. Stogai pagaminti iš kanapių spalių kompozito turi įvairių privalumų: jie yra patvarūs, gali atlaikyti lietaus ir ekstremalių temperatūrų pokyčius, reikalauja mažiau energijos, yra ekonomiškai ir atsparūs ugniai [43].

2. Biokompozitų sudėtys ir tyrimo metodologija

2.1. Biokompozitų sudėtis ir gamyba

Biokompozitams buvo naudojamos dvi skirtingos organinės medžiagos – spygliuočių medienos pjuvenos ir pirolizuota mediena. Siekiant nustatyti, ar medienos atliekų frakcijos dydis turi įtakos gauto bandinio mechaninėms savybėms, buvo naudojamos skirtingo stambumo pjuvenos. Bandiniams su pirolizuota mediena buvo naudojamos tos pačios frakcijos organinės medžiagos. Visuose bandymuose naudojamas tas pats portlandcementis CEM I 42,5 N. Taip pat kai kuriuose bandiniuose buvo naudotas pucolaninis priedas – skalūnų pelenai. Tai mineralinė medžiaga, gaminama deginant skalūną. Betono su organiniu užpildu bandiniuose naudojamas tas pats superplastiklis „Sika ViscoCrete D-190“, kuris pasižymi vandens kiekio mažinimu mišinyje.



16 pav. Naudotos organinės medžiagos: smulkios ir stambios spygliuočių pjuvenos, pirolizuota mediena

4 lentelė. Betono su medienos atliekomis sudėtis

Sudėtis Nr.	Sudėtis kg/m ³				
	Portlandcementis	Smėlis	Užpildas	Vanduo	Superplastiklis
1M	360	1620	850	520	1,5
2M	178	985	510	297	1,8

1M sudėtyje naudojamas organinių medžiagų užpildas, kur aliuminio sulfate 7 paras mirkytos smulkios pjuvenos granuliuojamos kartu su kalkėmis ir gaunami dirbtiniai užpildai (žr. 7 lentelę, užpildo Nr. 1). Maišant biokompozito medžiagas tarpusavyje pastebėta, kad reikalingas didesnis vandens kiekis, todėl siekiant gauti geresnes bandinio mechanines savybes, į mišinį įlašinama superplastiklio.

2M sudėtis pakito atlikus pirmojo bandinio (1M) stiprumo gniuždant tyrimą. Atliekant tų pačių pjuvenų mirkytų aliuminio sulfate granuliavimą įdedama, ir kalkių ir cemento (žr. 7 lentelę, užpildo Nr. 2), o pačio biokompozito sudėtyje cemento kiekis sumažintas siekiant sunaudoti kuo mažiau šio rišiklio.

5 lentelė. Presuoto biokompozito su medienos atliekomis sudėtis

Sudėtis Nr.	Sudėtis kg/m ³						
	Portlandcementis	Skalūnų pelenai	Gesintos kalkės	Užpildas	Vanduo	Stambios pjuvenos	Smulkios pjuvenos
1MP	139	310	73	209	130	90	290
2MP	0	353	205	291	114	134	432
3MP	0	649	110	314	122	147	404
4MP	0	649	110	314	217	105	325

5MP	0	412	149	291	114	134	432
6MP	0	305	249	291	114	134	432

1MP sudėtyje naudojami dirbtiniai užpildai, kurie gauti iš smulkių medienos atliekų mirkytų aliuminio sulfate ir vėliau granuliuotų kartu su kalkėmis (žr. 7 lentelę, užpildo Nr. 1). Siekiant padidinti užpildų stiprumą, jie buvo karbonizuoti. Taip pat kaip užpildas naudojamos smulkios ir stambios aliuminio sulfate mirkytos pjuvenos, kurios į mišinį dedamos nusunktos.

2MP ir 3MP sudėtyse naudojami tie patys užpildai kaip ir 1MP, bet nenaudojamas cementas ir padidinamas įmirkytų stambių bei smulkių pjuvenų kiekis. 2MP sudėtyje padidinamas gesintų kalkių kiekis bei pastebėta, kad mišiniui reikalingas mažesnis vandens kiekis. 3MP sudėtyje vietoj gesintų kalkių padidinamas skalūnų pelenų kiekis.

4MP sudėtyje naudojant 2MP biokompozito proporcijas naudojamos sausos neapdorotos pjuvenos. Naudojamas dirbtinis užpildas, kuriame organinės medžiagos taip pat yra papildomai neapdirbtos (žr. 7 lentelę, užpildo Nr. 4). Ruošiant šio biokompozito masę, maišymosi procesas vyko labai sunkiai, buvo reikalingas didesnis vandens kiekis, nes visas vanduo buvo sugeriamas organinių medžiagų.

5MP ir 6MP sudėtys panašios į 2MP bandinio sudėtį, tačiau skiriasi naudojamų rišiklių kiekio pagal tūrį santykis. 5MP bandinio sudėtyje naudojamų skalūnų pelenų ir gesintų kalkių santykis 1,3:0,7, o 6MP sudėtyje – 0,7:1,3. Šiuose bandiniuose cementas nenaudojamas.

6 lentelė. Betono su pirolizuota mediena sudėtis

Sudėties Nr.	Sudėtis kg/m ³						
	Portlandcementis	Skalūnų pelenai	Gesintos kalkės	Užpildas	Smėlis	Vanduo	Superplastiklis
1A	146	-	-	417	-	243	1,5
2A	150	380	90	430	830	400	1,5
3A	150	380	90	530	830	400	1,5
4A	150	380	90	630	830	400	1,5

1A sudėtyje naudojamas dirbtinis užpildas iš granuliuotos smulkintos pirolizuotos medienos ir kalkių (žr. 7 lentelę, užpildo Nr. 3). Atliekant mišinio maišymą pastebėta, kad reikalingas didesnis vandens kiekis nei įprastai, todėl siekiant nesumažinti stipruminių biokompozito savybių, į mišinį įlašinama superplastiklio.

2A, 3A ir 4A sudėtys gana panašios, tik didėja sunaudoto užpildo kiekis. Šioje sudėtyje naudojamas toks pats dirbtinis užpildas kaip ir sudėtyje 1A. Siekiant sunaudoti daugiau atliekų taip pat mišinyje naudojami skalūnų pelenai bei šiek tiek kalkių. Dėl didesnio rišiklio kiekio padidėja ir vandens kiekis mišinyje.

2.2. Tyrimo metodologija

Medienos atliekų papildomas apdorojimas

Atlikta literatūros analizė parodė, jog biokompozitas su sausomis, papildomai neapdorotomis medienos atliekomis pasižymi prastesnėmis mechaninėmis savybėmis dėl organinių medžiagų didelio vandens įgeriamumo bei jų cheminės sudėties. Norint palyginti, kaip pasikeičia biokompozito savybės naudojant neapdorotas medžiagas, vienas bandinys paruošiamas su sausomis pjuvenomis, tačiau kituose biokompozitų bandymuose stambios bei smulkios pjuvenos buvo paruošiamos

naudojant kompleksinius mineralizatorius: gesintas kalkes $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bei aliuminio sulfatą $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Aliuminio sulfato sukurta rūgštinė terpė stabdo cukraus išsiskyrimą iš organinių medžiagų bei vandens įgeriamumą, o gesintos kalkės padidina pirmojo mineralizatoriaus efektyvumą, neutralizuoja susidariusias silpnas acto CH_3COOH ir sieros H_2SO_4 rūgštis bei pagerina mišinio technologiškumą. Pirmiausiai sausos organinės medžiagos buvo 3 minutes maišomos $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ tirpale, kur aliuminio sulfato dedama 9 % nuo organinių medžiagų masės. Palikus mišinį 15 minučių, kad įvyktų mineralizacija, įdedama 18 % nuo organinių medžiagų masės gesintų kalkių. Užmerktos medienos atliekos pradedamos naudoti savaitė po užmerkimo.

Pirmieji užpildų su spygliuočių mediena stiprio pagal skalumą bandymų rezultatai parodė, kad toks mineralizatorių naudojimas padeda, tačiau stipriai nesustabdo cukraus išsiskyrimo. Siekiant gauti dar didesnę mineralizatorių efektyvumą atliekami 2 papildomi pjuvenų paruošimai naudojant skystą stiklą ir natrio šarmą NaOH . Pirmiausiai pjuvenos yra apipurškiamos 15% $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ tirpalu ir paliekamos mažiausiai 15 min, kad išsiskirtų rūgštys, stabdančios cukraus išsiskyrimą, tuomet viena dalis puvenų yra apipurškiama 1:1 santykiu su vandeniu praskiestu skystu stiklu, o kita dalis – natrio šarmu. Praėjus dar 15 min paruoštos pjuvenos gali būti naudojamos ruošiant dirbtinį užpildą granuliatoriuje. Pastebėta, kad užpildo su pjuvenomis apipurkštomis skystu stiklu kietėjimo procesas vyko 2 kartus greičiau nei užpildo su natrio šarmu apipurkšta organine medžiaga. Toks papildomas paruošimas davė geresnius užpildų stiprio pagal skalumą bandymo rezultatus nei naudojant gesintas kalkes (žr. 8 lentelę).

Organinių medžiagų vandens įgeriamumas

Atlikus medienos atliekų papildomą apdorojimą, buvo siekiama nustatyti vandens įgertį. Buvo pasverta po 100 g mineralizatoriuose įmirkusių smulkių ir stambių pjuvenų bei džiovinama tol, kol medžiagos visiškai išdžiūvo. Išdžiūvusios organinės medžiagos vėl pasveriamos ir vandens įgertis apskaičiuojama pagal formulę:

$$W = \frac{W_w - W_d}{W_w} \cdot 100\% \quad (1)$$

čia

W – organinės medžiagos vandens įgėris, %

W_w – organinės medžiagos masė iki džiovinimo, g

W_d – organinės medžiagos masė po džiovinimo, g



17 pav. Pjuvenos po džiovinimo – smulkios (kairėje) ir stambios (dešinėje)

Dirbtinių užpildų ruošimas

Dirbtiniams užpildams iš organinių medžiagų paruošti buvo naudojamas granulatorius (žr. 18 pav.). Aglomeracijos principu veikiamos atskiros medžiagos sulimpa vienos su kitomis ir sudaro apskritimo formos dirbtinius užpildus. Kaip rišamoji medžiaga šiame procese naudojamos kalkės ir cementas. Granuliavimo procesu gaminant užpildus su medienos atliekomis pirmiausiai supilamos organinės medžiagos, tuomet rišiklis ir galiausiai vanduo. Vanduo šio granuliavimo metu nenaudojamas užpilduose, kur medienos pjuvenos prieš tai buvo mirkomos mineralizatoriuje, todėl aglomeracijos procesui įvykti užtenka vandens, kurį organinės medžiagos įgėrė papildomo paruošimo metu. Ruošiant dirbtinius užpildus su pirolizuota mediena pirmiausiai į granuliatorių pilama organinė medžiaga, tuomet rišiklis, šiuo atveju kalkės, ir galiausiai vanduo. Vanduo nepilamas visas iš karto, nes tuomet susidaro daug skirtingos frakcijos užpildų, stengiamasi vandenį išskirstyti taip, kad jo užtektų viso granuliavimo proceso metu.



18 pav. Granulatorius dirbtinių užpildų gamybai

Proceso metu gautam rezultatui daug įtakos turėjo naudojamo vandens kiekis. Siekiant gauti kuo geresnių stipruminių savybių užpildus, buvo stengiamasi naudoti kuo mažiau vandens. Tačiau dėl per daug mažo vandens kiekio aglomeracija neįvykdavo iki galo, trūko sukibimo, o panaudojus per daug vandens užpildai per stipriai sukibdavo ir iš mažų apskritimo formos užpildų tapdavo vientisa masė ar daug didesnio skersmens užpildais.



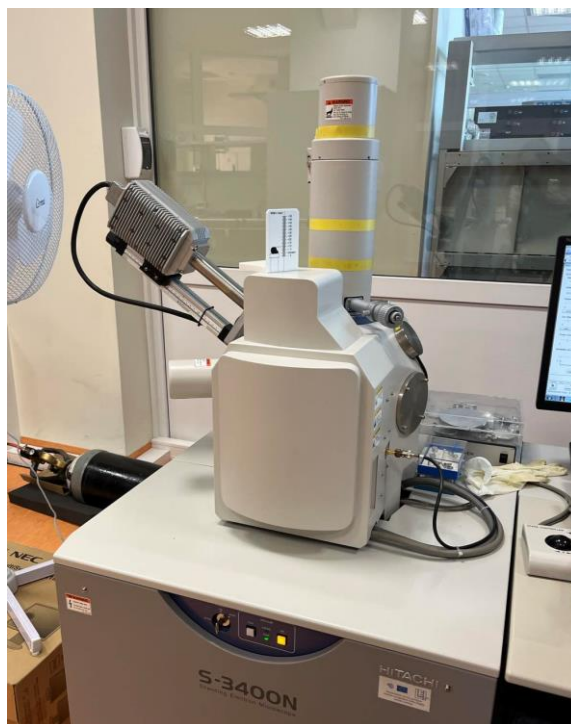
19 pav. Užpildas su per dideliu vandens kiekiu (kairėje), užpildas su reikiamu vandens kiekiu (dešinėje)

7 lentelė. Dirbtiniams užpildams naudojamų mišinių sudėtys, m³

Užpildo Nr.	Organinė medžiaga			Riškis		Vanduo, kg
	Pjuvenos		Pirolizuota mediena, kg	Kalkės, kg	Cementas, kg	
	Masė, kg	Paruošimas				
1	408	Al ₂ (SO ₄) ₃ + Ca(OH) ₂ + 7 d. mirkymo	-	408	-	-
2	359	Al ₂ (SO ₄) ₃ + Ca(OH) ₂ + 7 d. mirkymo	-	299	179	-
3	-	-	189	377	-	245
4	408	-	-	408	-	460
5	408	Al ₂ (SO ₄) ₃ + skystas stiklas	-	136	272	260
6	408	Al ₂ (SO ₄) ₃ + NaOH	-	136	272	260

Užpildų tyrimas skenuojamuoju elektroniniu mikroskopu (SEM)

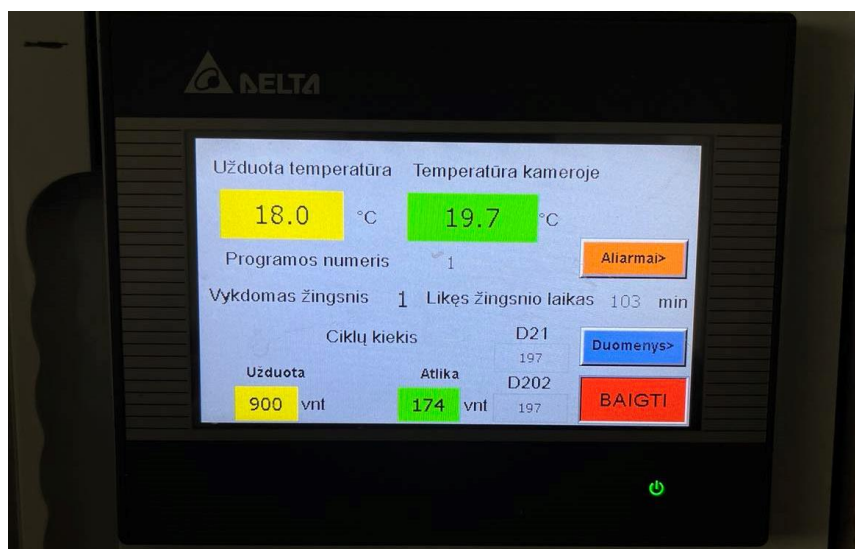
Siekiant pamatyti kaip tarpusavyje veikia organinė medžiaga bei riškis, buvo panaudotas SEM. Prietaiso veikimo principas paremtas antriniais elektronais, kurie vakuume atsispindi nuo bandinio paviršiaus, kai jis yra peršviečiamas pirminių elektronų ir taip sugeneruojamas mėginio atvaizdas. Norint gauti kokybiškus vaizdus, dirbtinių užpildų paviršius turi būti pakankamai lygus. Bandymo metu taip pat buvo atlikta pasirinktos srities cheminės mikro-analizės tyrimas.



20 pav. Skenuojamasis elektroninis mikroskopas „Hitachi S-3400N“

Dirbtinių užpildų atsparumo šalčiui nustatymas

Šiam bandymui atlikti naudojama šildymo–šaldymo kamera „AFINOX“. Bandymui atrinkti 3 skirtingų tipų užpildai – 1, 2 ir 3 (žr. 7 lentelę). Kiekvieno užpildo nedidelis kiekis užpilamas 3 % NaCl tirpalu ir įdedamas į kamerą, kurioje dažniausiai atliekami 28 šaldymo ir atšildymo ciklai. Po kiekvieno ciklo stebima, ar neatsiranda vizualiai patebimų pakitimų. Po 7 ciklų bandymas buvo sustabdytas, kai pastebėti ryškūs užpildų pakitimai.



21 pav. Šildymo–šaldymo kameros rodikliai

Dirbtinių užpildų stipris pagal skalumą naudojant cilindro metodą

Bandymas atliekamas vadovaujantis standartais LST EN 13055-1:2004 [44] ir LST 1476.7:1997 [45]. Siekiant nustatyti pasirinktų užpildų Nr. 1, 3, 5 (žr. 7 lentelę) didžiausią galimą

ardomąją galią naudojamas presas bei cilindras. Taip pat palyginimui naudojamas lengvas užpildas – keramzitas. Pirmiausiai vienos rūšies užpildai yra supilami į cilindrą ir pastatomi ant vibracinio stalo, kur 3–60 sekundžių vyksta užpildo tankinimas. Baigus tankinimą išlyginamas paviršius ir dedamas stūmoklis su rėmu. Cilindras su sutankintu užpildu dedamas į presą ir gniuždomas kol pasiekiamos 10 mm ir 20 mm užpildo deformacijos.

Bandinių formavimas

Bandinių formavimui naudojami du būdai: presavimas presavimo įrenginiu gyrotoriumi ir pylimas į kubo formos 100x100x100 mm formeles. Naudojant giratorių biokompozito masė turi būti tokia, kad suspaudus rankoje mišinys išlaikytų įgytą suspaudimo formą, bet nebūtų per daug šlapias. Gauta masė dedama į tam skirtą indą ir upildoma 2/3 jo tūrio. Giratoriuje parenkama programa, kurios metu bandinys yra veikiamas 69 kPa slėgiu 40 ciklų.



22 pav. Giratorius „Controls“

Biokompozitų ir betonų su organinėmis medžiagomis kietinimas

Bandiniai buvo kietinami dviem būdais: natūraliai ore ir anglies dioksido dujų kameroje. Kameroje karbonizavimo metu buvo palaikoma 20 °C temperatūra, santykinis drėgnumas – 68 %, anglies dioksido koncentracija – 19 %. Kietinimas dujų kameroje truko parą laiko, vėliau bandiniai buvo paliekami kietėti dar 6 paras natūraliai ore, kur kambario temperatūra 20–25°C. Pasirinkti du skirtingi kietinimo būdai, siekiant sužinoti, ar karbonizavimas turi įtakos mechaninėms biokompozitų savybėms bei siekiant sunaudoti CO₂ dujas.

Bandinių tankio nustatymas

Bandinio tankis nustatomas praėjus 7 paroms po suformavimo, kai bandinys jau yra sukietėjęs. Pirmiausiai gaunama bandinių masė juos pasveriant svarstyklėmis. Tuomet slankmačiu matuojamas bandinio aukštis ir diametras (cilindrui) arba plotis, aukštis, ilgis (kubui, prizmei). Turint šiuos duomenis apskaičiuojamas bandinio tankis pagal formulę:

Cilindrui:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi \cdot r^2 \cdot h} \quad (2)$$

čia

ρ - tankis, kg/m³

m – bandinio masė, kg

V – bandinio tūris, m³

r – bandinio spindulys, m

h – bandinio aukštis, m

Kubui ar prizmei:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{a \cdot b \cdot h} \quad (3)$$

čia

a – bandinio plotis, m

b – bandinio ilgis m

Bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas

Biokompozitų gniuždomasis stipris nustatomas naudojantis bandymo mašina „Tony Technik“. Biokompozitų mechaninių savybių nustatymui nėra standarto, todėl naudojamas betono gaminiams skirtas standartas ISO 1920-4:2020. Bandiniai apkraunami 100 kN per sekundę, įvykus suirimui bandymas stabdomas. Gniuždomasis stipris nustatomas remiantis LST EN 679:2005 standartu ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4)$$

čia

f_c – gniuždomasis stipris, MPa

F – didžiausia apkrova, N

A_c – apkrauto skerspjūvio plotas, mm²



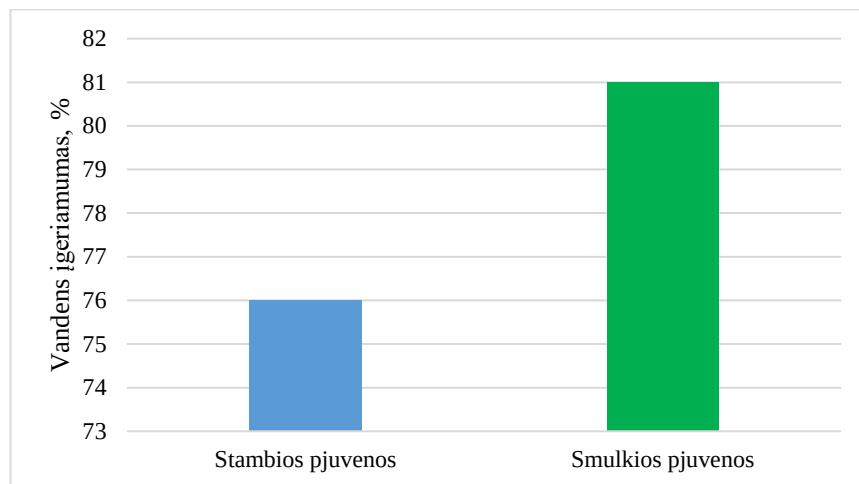
23 pav. Gniuždymo bandymui naudojama mašina „Tony Technik“

Biokompozito šiluminės savybės. Šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimas

Kadangi biokompozitas nepasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, jo naudojimas laikančiųjų konstrukcijų gamybai nėra tinkamas. Tačiau dėl geresnių šilumos izoliacijos savybių, mažesnio tankio bei energijos poreikio gali tapti alternatyva termoizoliacinėms medžiagoms. Siekiant nustatyti blokelių su termoizoliaciniu sluoksniu pagamintu iš medienos pjuvenų biokompozito šilumos perdavimo koeficientą ir palyginti su keramzitbetonio blokeliu, naudojama „THERM“ programa. Programoje šilumos perdavimo koeficientas U suskaičiuojamas automatiškai, kai kiekvienam kūnui yra priskiriamas projektinis šilumos laidumo koeficientas.

3. Tyrimo rezultatai ir jų analizė

3.1. Medienos pjuvenų vandens absorbcija



24 pav. Medienos pjuvenų vandens įgerties rezultatai

Gauti vandens įgeriamumo rezultatai parodė, kad organinių medžiagų masė po džiovinimo sumažėjo 76–81 %. Taip pat priklausomai nuo organinių medžiagų frakcijos kinta ir įgeriamo vandens kiekis. Remiantis atliktu tyrimu, kuo stambesnės medžiagos, tuo mažesnis vandens įgeriamumas.

3.2. Dirbtinių užpildų stipris pagal skalumą

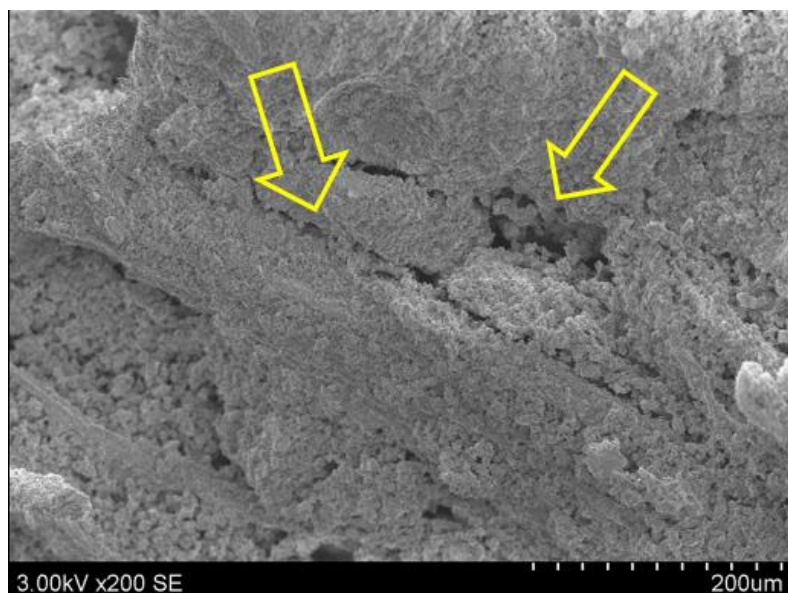
8 lentelė. Dirbtinių užpildų ardomoji apkrova

Užpildo Nr.	Ardomoji apkrova, kN	
	10 mm	20mm
1	3,1	5,4
3	4,8	6,2
5	6,7	15,3
Keramzitas	4,9	7,7

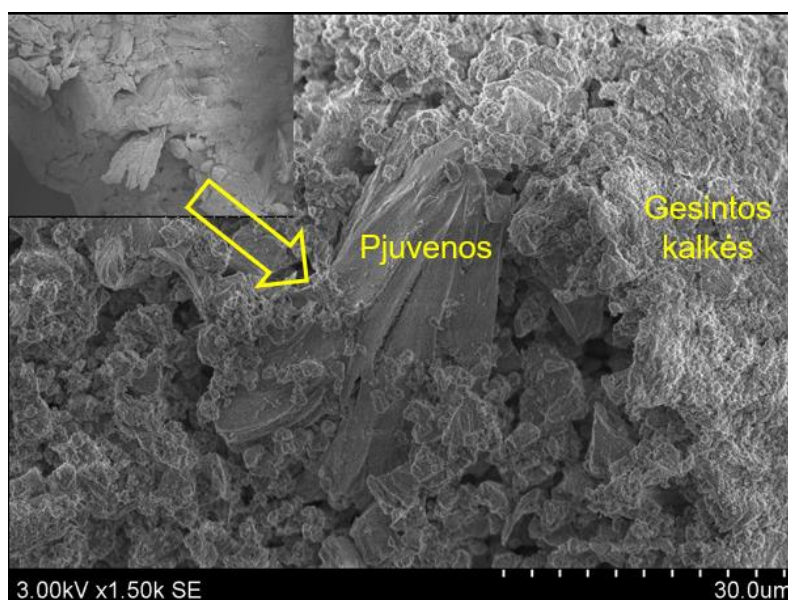
Atliktas bandymas parodė, kad silpniausias yra užpildas, kuriame naudojamos aliuminio sulfato tirpale ir gesintose kalkėse mineralizuotos pjuvenos su gesintų kalkių rišikliu. Jo stiprumas lyginant su lengvu keramzito užpildu yra mažesnis 30 %. Užpildas, kuriame pjuvenos buvo mineralizuotos Al_2SO_4 tirpalu bei skystu stiklu, su cemento ir gesintų kalkių rišikliu yra pats stipriausias. Jo stiprumas už keramzito užpildą didesnis 50 %.

3.3. Užpildų analizė skenuojamuoju elektroniniu mikroskopu

Skenuojamuoju elektroniniu mikroskopu buvo tiriamas užpildas Nr. 1 (žr. 7 lentelę). 26 pav. matomas 200 kartų SEM priartintas perskelto dirbtinio užpildo vaizdas. Kontakto zona tarp medienos plaušo ir gesintų kalkių yra ganėtinai silpna, gerai matomos atsiskyrimo zonos. Taip pat matoma daug įvairių plyšių bei ertmių, kurios galėjo atsirasti dėl prasto sukibimo tarp organinės medžiagos ir rišiklio arba dėl užpildo skėlimo perpus. 27 pav. matomas 1500 kartų SEM priartintas medienos plaušas ant kurio įvairiose vietose yra prikibusios kalcio hidroksido dalelės.

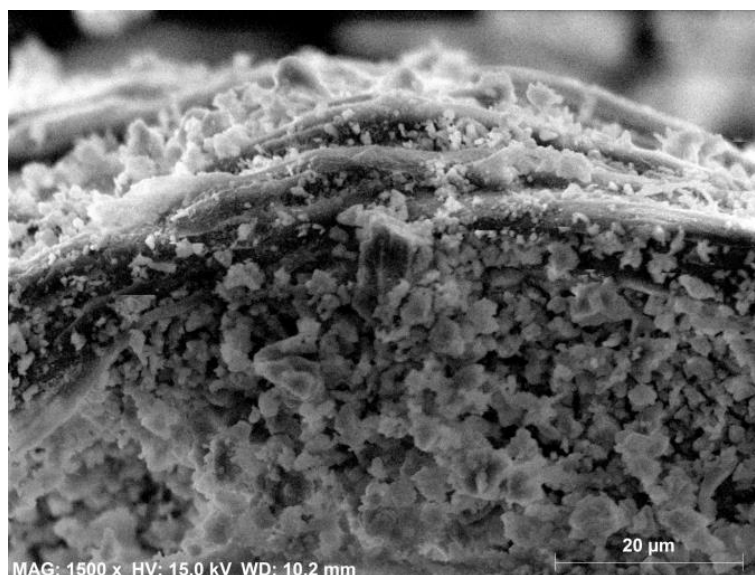


25 pav. Užpildo analizė SEM (x200 didinimas)

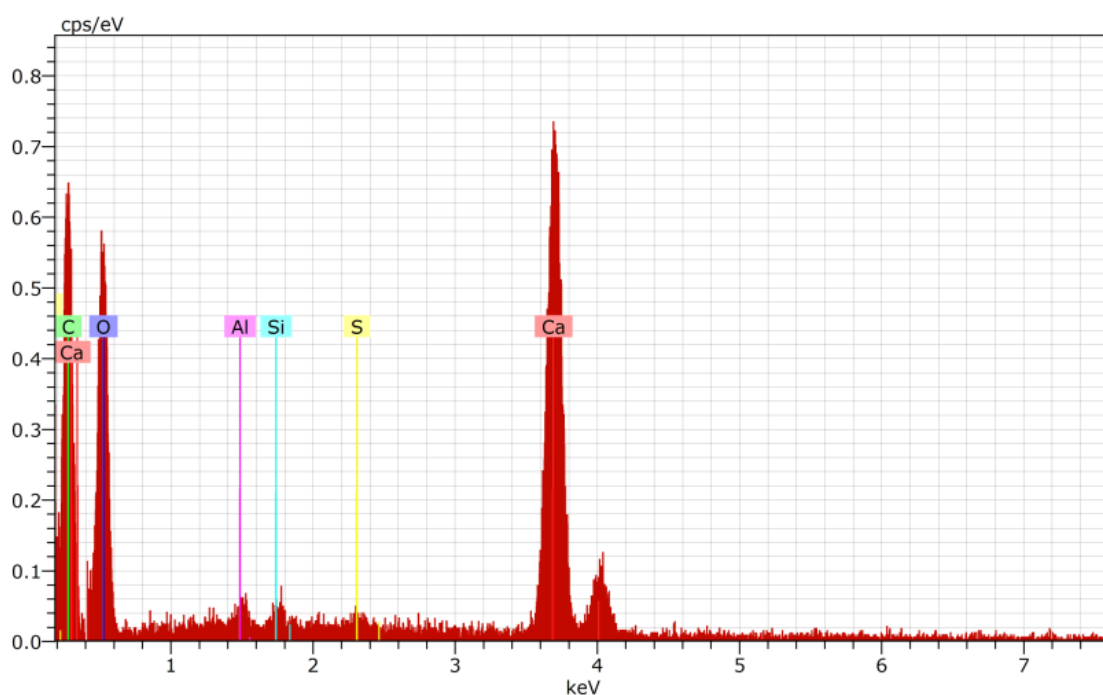


26 pav. Užpildo analizė SEM (x1500 didinimas)

Taip pat skenuojamuoju elektroniniu mikroskopu atlikta pasirinktos vietos (žr. 28 pav.) cheminė analizė. Analizė parodė, kokių cheminių elementų yra pasirinktoje užpildo vietoje. Kaip ir buvo galima numatyti, daugiausiai užpildo sudėtyje yra kalcio, deguonies ir anglies. Taip pat dėl papildomo organinės medžiagos paruošimo naudojant aliuminio sulfatą, sudėtyje yra aliuminio bei sieros. Cheminio elemento silicio atsirasti galėjo dėl nepakankamai švarių indų ar semtuvėlių, taip pat yra tikimybė, kad pjuvenose galėjo būti smėlio priemaišų (žr. 29 pav. ir 9 lentelę).



27 pav. Užpildo cheminės analizės vieta (x1500 didinimas)



28 pav. Cheminės mikro-analizės tyrimo rezultatai

9 lentelė. Elementų kiekis, %

Elementas	Kiekis, %
Kalcis (Ca)	36,06
Anglis (C)	14,35
Deguonis (O)	48,08
Aliuminis (Al)	0,47
Silicis (Si)	0,50
Siera (S)	0,54

3.4. Dirbtinio užpildo atsparumas šalčiui

Užpildų atsparumo šalčiui rezultatai buvo vizualiai vertinami po 7 ciklų. Geriausiai savo struktūrą išlaikė užpildai, kuriuose organinė medžiaga buvo medienos pjuvenos, o rišikliui naudojamos

gesintos kalkės ir portlandcementis. Labiausiai šildymo – šaldymo ciklai paveikė užpildus, kuriuose kaip organinė medžiaga buvo naudojama pirolizuota mediena, o rišiklis – gesintos kalkės. Taip pat nemažai struktūrinių pokyčių buvo galima pastebėti ir užpilduose, kurių sudėtyje yra medienos pjuvenos ir gesintos kalkės. Galima teigti, kad portlandcementis naudojamas kaip rišamoji medžiaga suteikia užpildui geresnes savybes padedančias atlaikyti šildymo – šaldymo poveikį.



29 pav. Užpildai prieš atsparumo šalčiui bandymą: pjuvenų ir gesintų kalkių užpildas (kairėje), pjuvenų, gesintų kalkių ir portlandcemenčio užpildas (viduryje), pirolizuotos medienos ir gesintų kalkių užpildas (dešinėje)



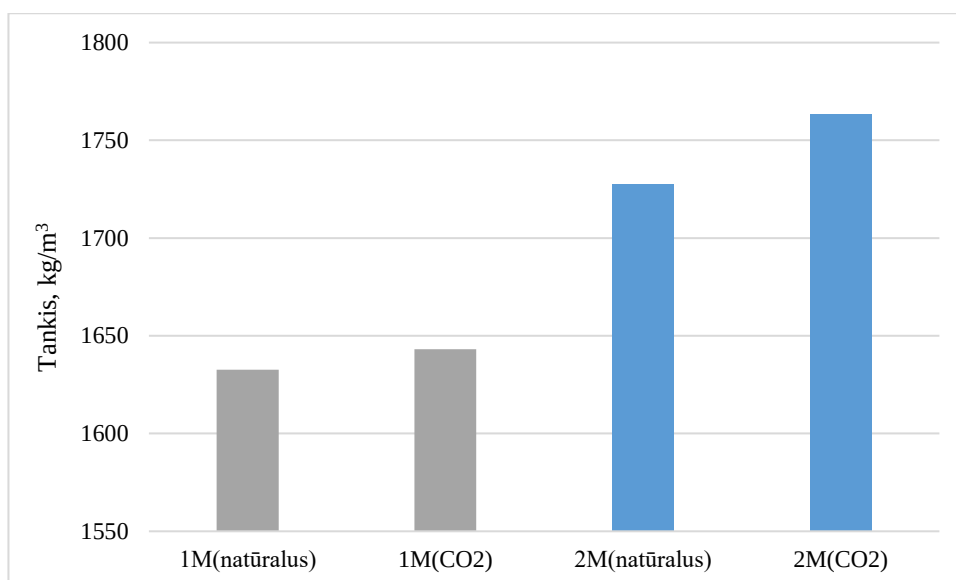
30 pav. Užpildai po atsparumo šalčiui bandymo: pjuvenų ir gesintų kalkių užpildas (kairėje), pjuvenų, gesintų kalkių ir portlandcemenčio užpildas (viduryje), pirolizuotos medienos ir gesintų kalkių užpildas (dešinėje)

3.5. Biokompozitų bandinių tankis

Bandinių tankis bei svoris buvo vertinamas praėjus 7 paroms po formavimo.

10 lentelė. Betono su medienos atliekomis tankio rezultatai

Sudėties Nr.	Kietinimo būdas	Matmenys, mm			Svoris, g		Tankis, kg/m ³	
		Ilgis	Plotis	Aukštis	Bandinio	Vidurkis	Bandinio	Vidurkis
1M	Natūralus	100,5	100,2	98,5	1661,1	1651,3	1675	1633
	Natūralus	100,2	100,7	102,3	1641,5		1590	
	CO ₂ kameroje	100,9	100,0	101,2	1678,1	–	1643	–
2M	Natūralus	100,1	100,8	99,6	1751,6	1760,1	1742	1728
	Natūralus	101,0	100,9	101,3	1768,7		1713	
	CO ₂ kameroje	100,8	100,3	99,2	1749,5	–	1764	–

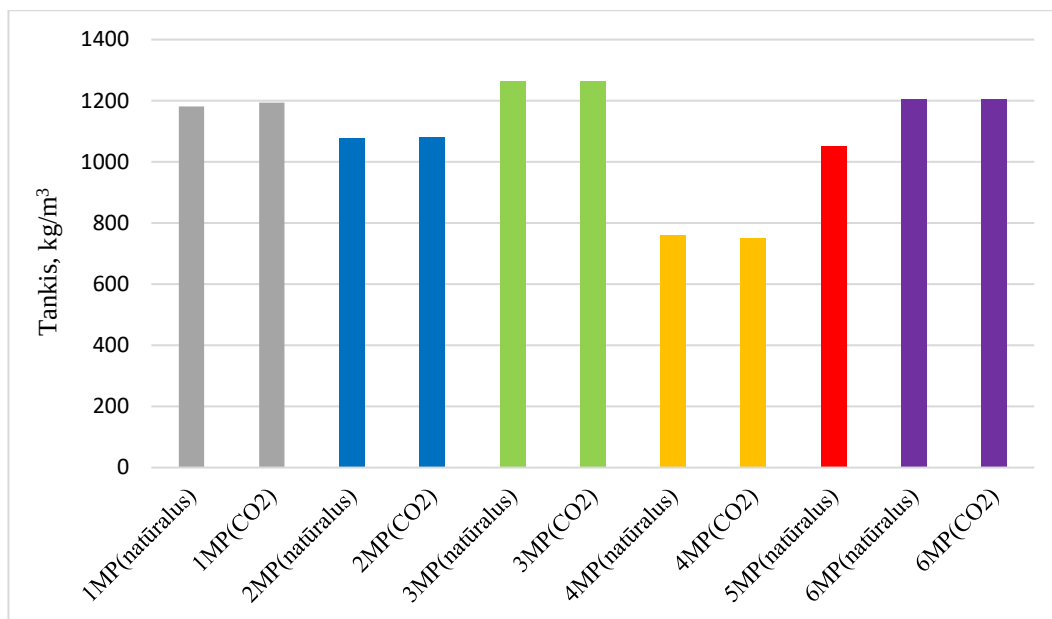


31 pav. Pjuvenų betono bandinių tankio rezultatų palyginimas

Atliktas betono su medienos atliekomis tankių nustatymas parodė, kad bandinių kietinimo sąlygos turi įtakos rezultatams. Gaminių kietinimas anglies dioksido kameroje padidino bandinių tankį 0,7–2,0 %. Pastebėta, kad bandinio, kur užpildui naudojamos medienos pjuvenos su dviem rišikliais – gesintomis kalkėmis ir portlandcemenčiu, tankis yra mažesnis 6 % nei bandinio, kur užpildui naudojamos medienos pjuvenų ir gesintų kalkių rišiklis. Tokius rezultatus galėjo lemti mažesnis vandens kiekis antrojo bandinio (2M) sudėtyje.

11 lentelė. Presuoto biokompozito su medienos atliekomis tankio rezultatai

Sudėties Nr.	Kietinimo būdas	Matmenys, mm		Svoris, g		Tankis, kg/m³	
		Diametras	Aukštis	Bandinio	Vidurkis	Bandinio	Vidurkis
1MP	Natūralus	100,1	70,9	672,9	727,9	1207	1181
	Natūralus	100,0	79,6	722,2		1156	
	Natūralus	100,4	81,4	765,4		1188	
	CO ₂ kameroje	100,6	80,5	751,0	–	1194	–
2MP	Natūralus	100,3	71,9	607,6	625,8	1070	1078
	Natūralus	99,9	80,8	682,9		1079	
	Natūralus	100,0	72,4	612,8		1079	
	CO ₂ kameroje	100,2	70,3	599,7	–	1082	–
3MP	Natūralus	100,6	73,6	733,4	765,9	1254	1263
	Natūralus	100,3	70,2	705,9		1273	
	Natūralus	100,2	81,6	812,3		1263	
	CO ₂ kameroje	100,0	81,9	811,9	–	1263	–
4MP	Natūralus	99,8	76,9	460,3	463,7	766	759
	Natūralus	100,6	72,1	448,2		783	
	Natūralus	100,9	80,3	473,9		738	
	CO ₂ kameroje	99,6	80,9	472,2	–	750	–
5MP	Natūralus	100,1	108,6	854,2	753,2	1000	1051
	Natūralus	100,2	82,3	697,2		1075	
	Natūralus	100,4	82,9	708,1		1079	
6MP	Natūralus	100,2	81,3	796,3	770,5	1243	1205
	Natūralus	100,9	80,4	761,2		1185	
	Natūralus	100,6	79,9	753,9		1188	
	CO ₂ kameroje	100,9	82,9	821,6	–	1204	–

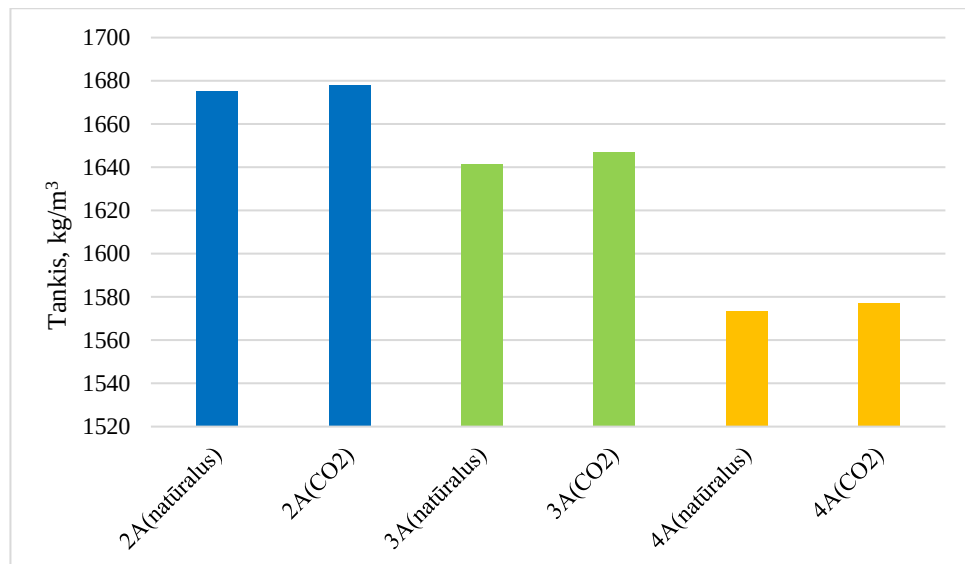


32 pav. Presuoto biokompozito su medienos atliekomis tankių palyginimas

Iš viso buvo nustatyti 6 skirtingų sudėčių biokompozitų, kietintų natūraliomis sąlygomis arba CO₂ kameroje, tankiai. Tankiai svyruoja nuo 749 iki 1263 kg/m³. Nustatyta, kad bandinių kietinimas CO₂ kameroje neturi didelios įtakos biokompozitų tankio padidėjimui. Kai kurių bandinių tankis padidėja tik 0,4–1,0 %, kitų sumažėja – 0,1–1,3 %. Mažiausias biokompozito tankis gautas, kai naudojamos neparuoštos, sausos pjuvenas, o rišiklių (skalūnų pelenų, kalkių ir cemento) santykis pagal tūrį yra 1:1:0. Didžiausias tankis gautas, kai naudojamos jau paruoštos pjuvenos, o tūrinis rišiklių santykis yra 1,5:0,5:0. Naudojant neapdorotas medienos pjuvenas, biokompozito tankis sumažėja 25 %.

12 lentelė. Betono su pirolizuota mediena tankio rezultatas

Sudėties Nr.	Kietinimo būdas	Matmenys, mm			Svoris, g		Tankis, kg/m ³	
		Ilgis	Plotis	Aukštis	Bandinio	Vidurkis	Bandinio	Vidurkis
1A	Natūralus	100,2	100,4	101,5	1547,2	1534,5	1515	1508
	Natūralus	100,9	100,3	100,2	1521,8		1500	
2A	Natūralus	101,1	101,0	99,9	1701,1	1707,7	1668	1675
	Natūralus	100,7	100,5	100,7	1714,2		1682	
	CO ₂ kameroje	100,6	100,9	100,9	1718,9	–	1678	–
3A	Natūralus	100,0	99,7	101,1	1654,2	1652,8	1641	1642
	Natūralus	100,8	99,9	99,9	1651,3		1642	
	CO ₂ kameroje	100,7	100,8	101,1	1690,1	–	1647	–
4A	Natūralus	100,2	100,1	101,3	1597,2	1602,5	1572	1574
	Natūralus	101,0	100,3	100,8	1607,8		1575	
	CO ₂ kameroje	100,9	100,8	100,6	1613,8	–	1577	–

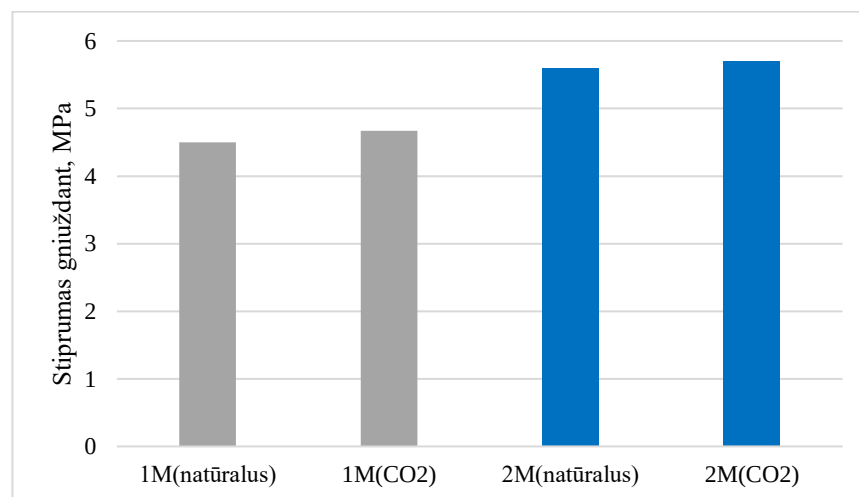


33 pav. Betono su pirolizuota mediena tankių palyginimas

Betonui su pirolizuota mediena kietinimo sąlygos taip pat neturi didelės įtakos. Lyginant bandinius, kurie buvo džiovinami natūraliomis sąlygomis su bandiniais, džiovintais CO₂ kameroje pastebėtas nežymus 0,2 % tankio padidėjimas. Siekiant palyginti kaip kinta bandinio tankis priklausomai nuo sunaudoto užpildo kiekio, bandinys 1A dėl kitokios sudėties neįtrauktas į grafinį tankių palyginimą (žr. 34 pav.). Kaip ir buvo galima tikėtis, bandinio tankis proporcingai mažėja didinant organinės medžiagos kiekį sudėtyje. Padidinus užpildo kiekį 100 kg/m³, bandinio tankis sumažėja 3–4 %.

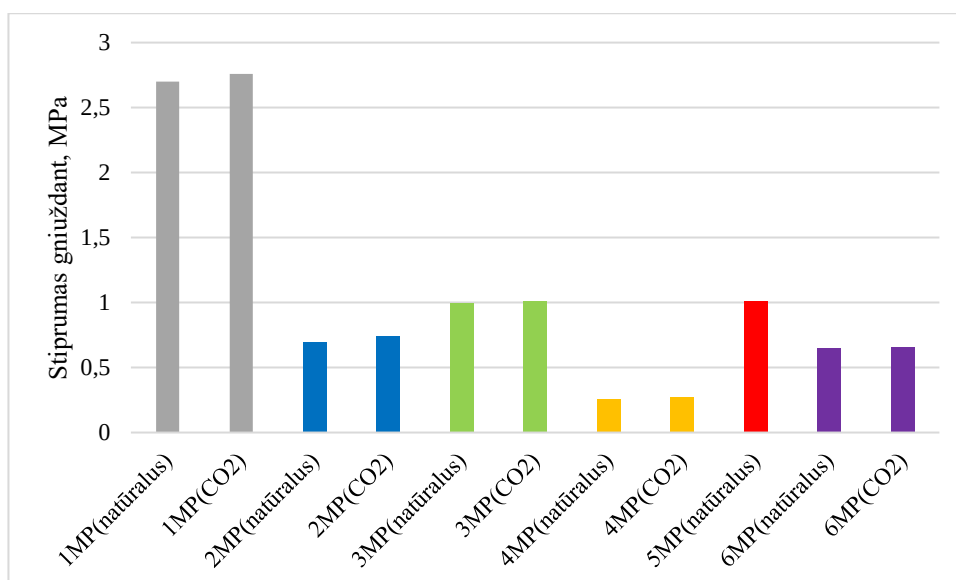
3.6. Biokompozitų gniuždomasis stipris

Bandinių gniuždomojo stiprio tyrimas buvo atliekamas po 7 parų kietėjimo.



34 pav. Betono su medienos atliekomis gniuždomasis stipris

Dviejų skirtingų sudėčių betono su spygliuočių medienos užpildu gautas stiprumas gniuždant svyruoja nuo 4,5 iki 5,7 MPa. Bandinių kietinimas CO₂ kameroje padidina biokompozitų stiprumą 3,8 % (1M sudėtis) ir 1,8 % (2M sudėtis). Gauti rezultatai rodo, kad bandinio su dirbtiniu užpildu iš pjuvenų, kalkių ir cemento stiprumas yra didesnis nei bandinio su pjuvenų ir kalkių užpildu. Nors antrojo bandinio 2M sudėtyje yra beveik perpus mažiau cemento, tačiau sumažintas dirbtinio užpildo bei vandens kiekis bandiniui suteikė 24 % didesnę stiprumą gniuždant.

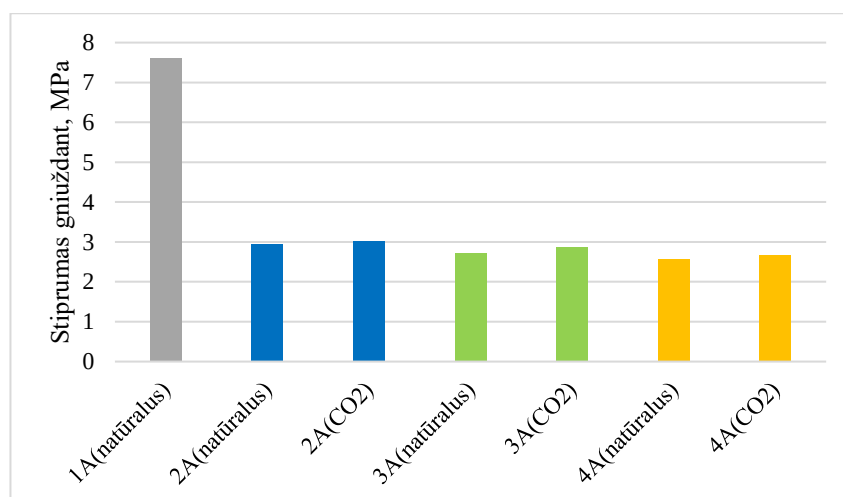


35 pav. Presuoto biokompozito su medienos atliekomis gniuždomasis stipris

6 skirtingų sudėčių presuoto biokompozito su spygliuočių medienos užpildu gniuždomasis stipris svyruoja nuo 0,3 iki 2,8 MPa. Bandinių kietinimas CO₂ kameroje nedavė didelio stiprumo prieaugio. Didžiausias skirtumas pastebėtas 1MP sudėties biokompozito, kurio stiprumas gniuždant padidėjo 2,2 %. Taip pat tik šio biokompozito sudėtyje yra naudojama rišamoji medžiaga portlandcementis, todėl jo stiprumas gniuždant yra pastebimai didesnis nei kitų bandinių. Mažiausias stiprumas gniuždant gautas naudojant papildomai neapdorotas, sausas pjuvenas. Jo stiprumas gniuždant lyginant su biokompozitu, kuriame naudojamos mineralizuotos pjuvenos, sumažėja 3 kartus. Lyginant biokompozitus, kurių sudėtyje nėra portlandcemenčio (2MP–6MP), didžiausias stiprumas gniuždant gautas, kai rišamųjų medžiagų skalūnų ir gesintų kalkių tūrinis santykis yra 1,5:0,5.



36 pav. Presuoto biokompozito skerspjūvis po gniuždymo bandymo



37 pav. Betono su pirolizuota mediena gniuždomasis stipris

Betono su pirolizuota mediena gniuždomasis stipris svyruoja nuo 2,6 iki 7,6 MPa. 1A sudėties bandinio stiprumas gniuždant kaip ir tankis žymiai skiriasi nuo kitų bandinių rezultatų, dėl savo sudėties. Kadangi sudėtyje buvo tik cementas, pirolizuotos medienos užpildas bei vanduo, jo stiprumas gniuždant už kitus bandinius buvo daugiau nei 2 kartus didesnis. Tačiau lyginant bandinius 2A–3A galima pastebėti, kad kietinimas anglies dioksido kameroje stiprumą gniuždant padidino 2,0–4,9 %. Betono su pirolizuota mediena stiprumas gniuždant kaip ir tankis proporcingai mažėja didinant organinės medžiagos kiekį sudėtyje. Padidinus organinio užpildo kiekį 100 kg/m^3 , stiprumas gniuždant sumažėja 6–8 %.

3.7. Biokompozito šiluminės savybės. Šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimas

Laboratorijoje pagaminamas blokelio, kuriame gniuždymą perima medinė dvitėjinė sija, o tarpai užpildomi rankiniu būdu sutankinto biokompozito su pjuvenomis mase, maketas. Pasirinkta naudoti 5MP sudėtį tarpams užpildyti dėl pakankamai mažo tankio ir didelio stiprumo gniuždant rezultato (1051 kg/m^3 , 1,0 MPa). Blokelio tarpuose esančio biokompozito tankis turėtų būti dar mažesnis, dėl rankinio tankinimo. Programoje „THERM“ suvedama kiekvieno sluoksnio projektinė šilumos laidumo koeficiento vertė λ_{ds} (žr. 13 lentelę). Kadangi biokompozito šilumos laidumo koeficientas nežinomas, jis priimamas pagal jo tankį, kuris yra artimas pjuvenų betonui.

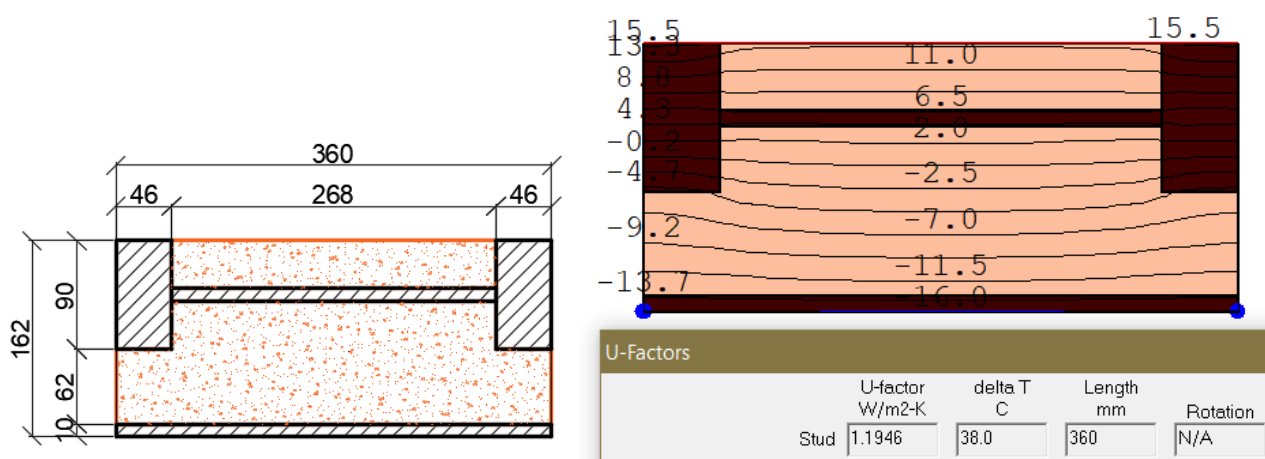
13 lentelė. Medžiagų projektinės šilumos laidumo koeficientų vertės

Eil. Nr.	Pavadinimas	Projektinė šilumos laidumo koeficiento vertė, λ_{ds} , W/(mK)
1	Biokompozitas	0,3
2	Termoizoliacinis sluoksnis	0,035
3	Medinės sijos sienutė	0,15
4	Medinės sijos lentynos	0,13
5	Keramzitbartonio blokelis	0,247

Užduodamos oro temperatūros: vidaus patalpų oro temperatūra – 20°C , lauko – -18°C .

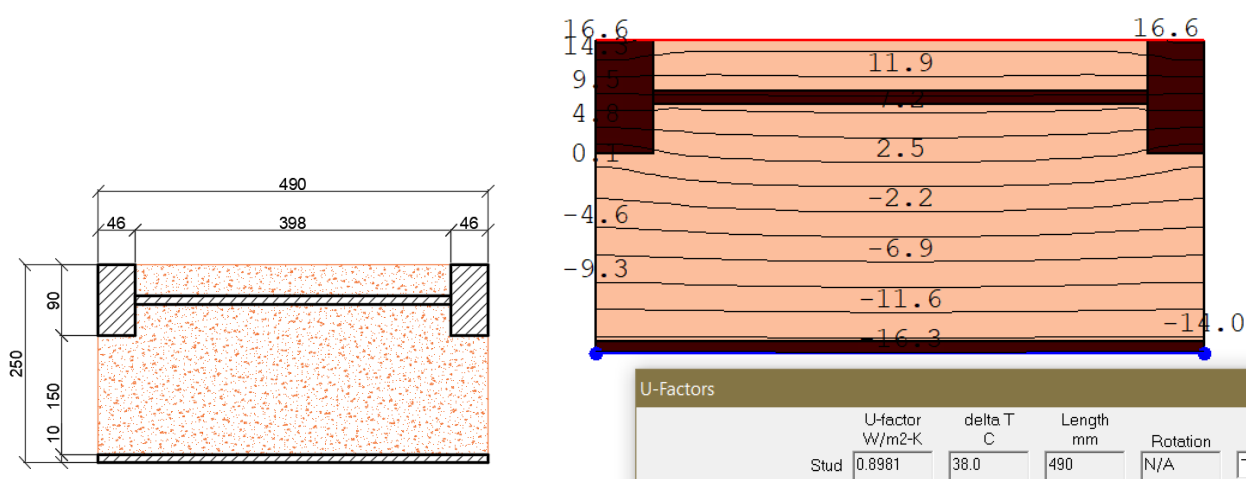


38 pav. Blokelių maketas



39 pav. Blokelių maketo šilumos perdavimo koeficiento U skaičiavimas programa „THERM“

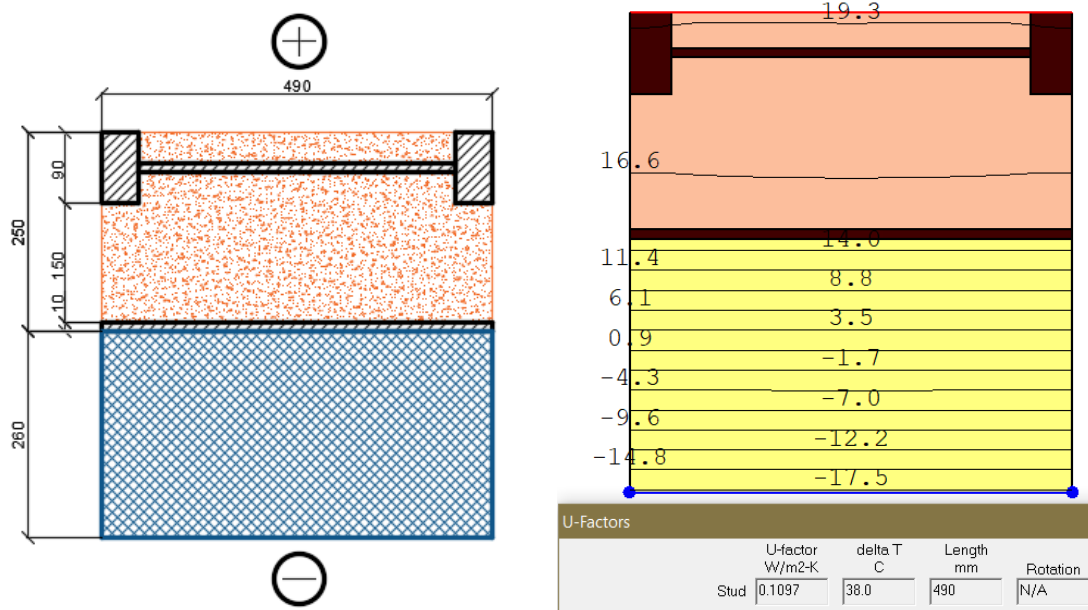
Siekiant palyginti sienos iš biokompozito bei keramzitbetonio blokelių šilumos perdavimo koeficientus, atliekami šilumos perdavimo pakartotiniai skaičiavimai pagal realaus dydžio blokelių matmenis.



40 pav. Realaus dydžio blokelių šilumos perdavimo koeficiento U skaičiavimas programa „THERM“

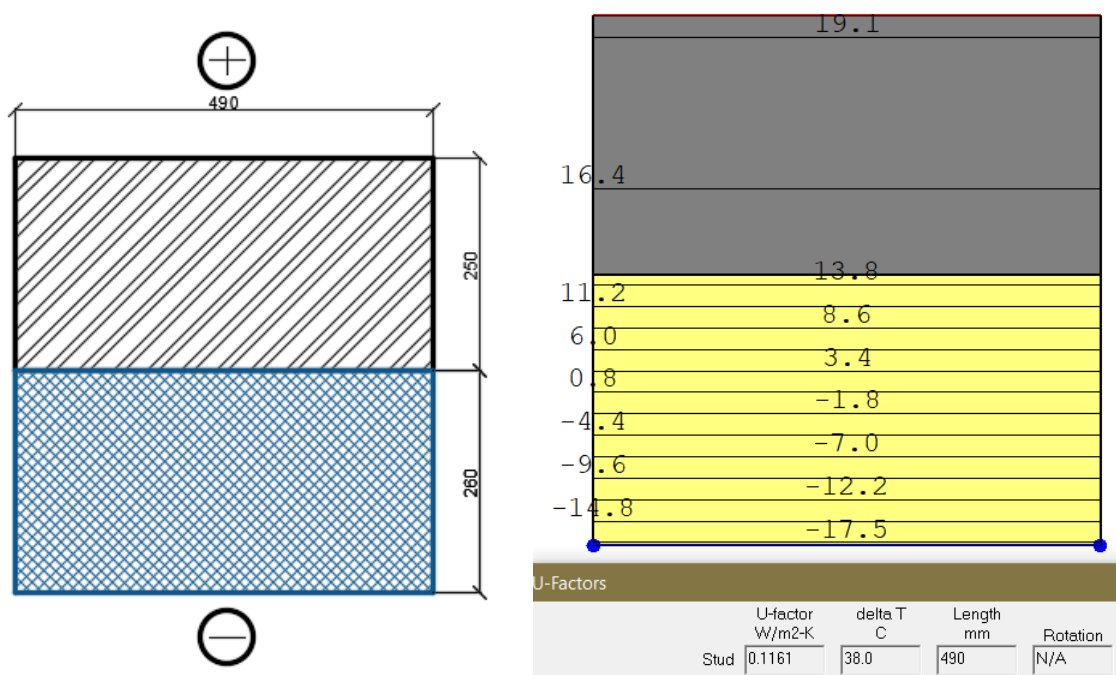
Gauta šilumos perdavimo koeficiento reikšmė neatitinka pagal STR 2.01.02:2016 [46] keliamus A++ energinio naudingumo klasės gyvenamojo pastato sienai keliamų reikalavimų ($U=0,11 \text{ W/(m}^2\text{K)}$), todėl atliekami skaičiavimai su papildomu termoizoliacinės medžiagos kiekiu, kol šilumos perdavimo

koeficientas bus tenkinamas. Blokelių su papildomu 260 mm storio termoizoliacijos sluoksniu šilumos perdavimo koeficientas atitinka A++ klasės pastatui keliamus reikalavimus.



41 pav. Realaus dydžio blokelių su papildomu termoizoliacijos sluoksniu šilumos perdavimo koeficiento U skaičiavimas programa „THERM“

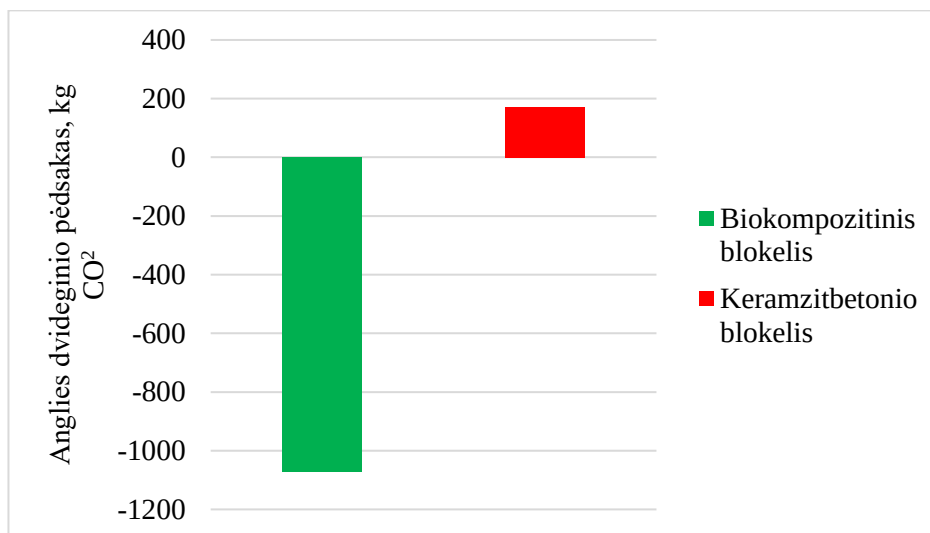
Taip pat su „THERM“ programa apskaičiuojama standartinio keramzitbetonio blokelių su 260 mm storio termoizoliacijos sluoksniu šilumos perdavimo koeficientas.



42 pav. Keramzitbetonio blokelių su termoizoliacijos sluoksniu šilumos perdavimo koeficiento U skaičiavimas programa „THERM“

Gauti rezultatai rodo, kad biokompozitinio blokelių su 260 mm termoizoliaciniu sluoksniu šilumos perdavimo koeficiento reikšmė $U=0,1097 \text{ W/m}^2\text{K}$ yra mažesnė už keramzitbetonio blokelių su tokio pat storio šilumos izoliacijos sluoksniu šilumos perdavimo koeficiento reikšmę $U=0,1161 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nors skirtumas nėra didelis, tačiau tai rodo, kad tokie biokompozito blokeliai gali būti naudojami

mažaaaukštėje gyvenamųjų namų statyboje vietoj keramzito blokelių. Biokompozito blokeliai lyginant su keramzito blokeliais pasižymi neigiama CO₂ emisija, nes gaminant biokompozitą nebuvo naudojamas cementas. Taip pat jų gamyboje naudojamos organinės medžiagos, medienos atliekos, todėl gamybos procesas yra ekonomiškėsnis. Norint pagaminti 1 m³ biokompozitinių blokelių, reikia 2,62 m³ spygliuočių medienos pjuvenų bei 0,12 m³ medienos dvitėjinėms sijoms pagaminti. Remiantis standartu LST EN 16449 [47] apskaičiuojamas organinių medžiagų anglies dvideginio pėdsakas, kuris yra lygus –1073 kg CO₂, kai tuo tarpu pagaminti 1 m³ keramzitbetonio blokelių reikia 190 kg cemento, kurio CO₂ pėdsakas yra 171 kg CO₂.



43 pav. Blokelių anglies dioksido emisijos palyginimas

Išvados

1. Tiriamajame darbe buvo pagaminti 6 skirtingų sudėčių presuoti biokompozitai su portlandcemenčio, skalūnų pelenų ir gesintų kalkių rišikliais. Kaip organinis dirbtinis užpildas šiuose bandiniuose buvo naudojamos spygliuočių medienos pjuvenos, kurios prieš granuliavimą buvo papildomai paruoštos. Biokompozitų tankis kinta nuo 750 iki 1263 kg/m³. Dideli tankių skirtumai pastebėti dėl kelių priežasčių: rišiklio, vandens ir organinės medžiagos kiekio, organinės medžiagos paruošimo būdo. Biokompozitų gniuždomasis stipris kinta nuo 0,6 iki 2,7 MPa. Stiprumo bandymo rezultatams didžiausią įtaką turi cemento ir pjuvenų kiekis.
2. Taip pat buvo pagaminti 6 skirtingų sudėčių betonai su organiniu užpildu. Kaip organinis dirbtinis užpildas šiuose bandiniuose buvo naudojamos spygliuočių pjuvenos ir pirolizuota mediena. Betonų tankis kinta nuo 1500 iki 1727 kg/m³, o stiprumas nuo 2,7 iki 7,6 MPa. Didžiausią įtaką rezultatams turi organinio užpildo ir cemento kiekis.
3. Papildomas organinių medžiagų paruošimas pagerina dirbtinio užpildo mechanines savybes. Nustatyta, kad skirtingų mineralizatorių naudojimas, neutralizuojant organinėse medžiagose esančius celiuliozę, hemiceliuliozę ir lingniną, skirtingai veikia spygliuočių medienos pjuvenų užpildą. Naudojant aliuminio sulfato ir gesintų kalkių mineralizatorių, užpildo ardomoji galia yra 30 % mažesnė už etaloninio keramzito užpildo ardomąją galią. Tačiau pjuvenų paruošimas naudojant aliuminio sulfatą ir skystą stiklą suteikia užpildui 50 % didesnę stiprumą nei keramzitinio užpildo.
4. Užpildų analizė skenuojamuoju elektroniniu mikroskopu parodė, kad kontakto zona tarp medienos plaušo ir gesintų kalkių yra silpna, gerai matomos plaušo atsiskyrimo vietos bei plyšiai.
5. Nustatyta, kad bandinių kietinimas anglies dioksido kameroje nežymiai pagerina fizikines ir mechanines biokompozito ir betono su organiniu užpildu fizikines ir mechanines savybes. Biokompozitų tankis padidėja 0,4–1,0 %, stiprumas gniuždant – 2,2 %. Betono su organiniu užpildu tankis padidėjo 0,2–2,0 %, o gniuždymo stipris – 1,8–4,9 %.
6. Biokompozitinio blokelių atitinkančio A++ klasės pastatui keliamus reikalavimus šilumos perdavimo koeficiento reikšmė yra nežymiai mažesnė už keramzitbetonio blokelių. Bet reiktų atkreipti dėmesį į tai, kad biokompozitinio blokelių gamyba yra daug ekonomiškesnė, nes gaminant biokompozitinį blokelį CO₂ pėdsakas yra lygus –1073 kg CO₂ dėl sudėtyje visiškai nenaudojamo cemento.

Literatūros sąrašas

1. LABARAN, Y.H., MATHUR, V.S., MUHAMMAD, S.U. and MUSA, A.A. Carbon Footprint Management: A Review of Construction Industry. *Cleaner Engineering and Technology* [interaktyvus].2022, **9**, 10-31 [žiūrėta 2023-03-16]. ISSN 2666-7908. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100531>.
2. GAGG, C.R. Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis. *Engineering Failure Analysis* [interaktyvus].2014, **40**, 114-140 [žiūrėta 2023-03-06]. ISSN 1350-6307. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>.
3. WINNEFELD, F., LEEMANN, A., GERMAN, A. and LOTHENBACH, B. CO2 Storage in Cement and Concrete by Mineral Carbonation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* [interaktyvus].2022, **38**, 10-19 [žiūrėta 2023-03-03]. ISSN 2452-2236. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100672>.
4. PULIKKALPARAMBIL, H. A Review on Sliding Wear Properties of Sustainable Biocomposites: Classifications, Fabrication and Discussions. *Heliyon* [interaktyvus].2023, **9**, 14-38 [žiūrėta 2023-03-16]. ISSN 2405-8440. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14381>.
5. MANU, T. Biocomposites: A Review of Materials and Perception. *Materials Today Communications* [interaktyvus].2022, **31**, 10-33 [žiūrėta 2023-03-16]. ISSN 2352-4928. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103308>.
6. GAILIUS A. *Kompozicinės Medžiagos Ir Dirbiniai Energetiškai Efektyvių Pastatų Statybai*. Vilnius „Tehnika“, 2012 [žiūrėta 2023-05-10]. ISBN 978-609-457177-0. Prieiga per: <http://dspace.vgtu.lt/handle/1/1368>.
7. ANDREW, J.J. and DHAKAL, H.N. Sustainable Biobased Composites for Advanced Applications: Recent Trends and Future Opportunities – A Critical Review. *Composites Part C: Open Access* [interaktyvus].2022, **7**, 10-22 [žiūrėta 2023-03-16]. ISSN 2666-6820. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220>.
8. *Wood: Material-Specific Data*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-12]. Prieiga per: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/wood-material-specific-data>.
9. SKRIPKIŪNAS G. *Statybinių Konglomeratų Struktūra Ir Savybės*. UAB „Vitae Litera“, 2007 ISBN 978-9955-686-50-7.
10. BALČIŪNAS G. Statybinių Kompozitų Su Pluoštinių Kanapių Spaliais Tyrimai [interaktyvus].2015, 1-134 [žiūrėta 2023-05-02]. ISSN 978-609-457-854-0. Prieiga per: <http://dspace.vgtu.lt/handle/1/1913>.
11. JAKIMAVIČIUS Č. *Medienotyra*. Kaunas: Technologija, 2003 ISBN 9986136334.
12. LIU, Z. Study on Wood Chips Modification and its Application in Wood-Cement Composites. *Case Studies in Construction Materials* [interaktyvus].2022, **17**, 13-50 [žiūrėta 2023-03-06]. ISSN 2214-5095. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01350>.
13. GUO, A., AAMIRI, O.B., SATYAVOLU, J. and SUN, Z. Impact of Thermally Modified Wood on Mechanical Properties of Mortar. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2019, **208**, 413-420 [žiūrėta 2023-04-16]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.016>.
14. ALRUBAIE, M., WTAIFE, S., JOUDAH, Z. and ABD KHALID, N.H. Compressive Strength of Light-Weight Concrete Material made from Treated Wood Waste as a Coarse Aggregate,. *Bioresources* [interaktyvus].2023, **18**, 111-130 [žiūrėta 2023-04-25]. Prieiga per: <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.111-130>.
15. SIDDIQUE, R., SINGH, M., MEHTA, S. and BELARBI, R. Utilization of Treated Saw Dust in Concrete as Partial Replacement of Natural Sand. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus].2020, **261**, 121226 [žiūrėta 2023-05-19]. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121226>.
16. ABED, J. and AHMED, B. Effect of Wood Waste as A Partial Replacement of Cement, Fine and Coarse Aggregate on Physical and Mechanical Properties of Concrete Blocks Units

- [interaktyvus].2019, **ol 11**, 229-239 [žiūrėta 2023-04-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.08.023>.
17. AWAL, A.S.M.A., AB KADIR, M.A. and HOSSAIN, M. Some Aspects of Physical and Mechanical Properties of Sawdust Concrete. *Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment* [interaktyvus].2016, **10**, 1918-1923 [žiūrėta 2023-05-16]. ISSN 978-4-9905958-4-5. Prieiga per: <https://doi.org/10.21660/2016.21.5304>.
 18. BATOOL, F., ISLAM, K., CAKIROGLU, C. and SHAHRIAR, A. Effectiveness of Wood Waste Sawdust to Produce Medium- to Low-Strength Concrete Materials. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus].2021, **44**, 10-32 [žiūrėta 2023-03-05]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103237>.
 19. DIAS, S. Physical, Mechanical, and Durability Properties of Concrete Containing Wood Chips and Sawdust: An Experimental Approach. *Buildings* [interaktyvus].2022, **12**, [žiūrėta 2023-05-05]. ISSN 2075-5309. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/buildings12081277>.
 20. WEI, Z., GU, K., CHEN, B. and WANG, C. Comparison of Sawdust Bio-Composites Based on Magnesium Oxysulfate Cement and Ordinary Portland Cement. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus].2023, **63**, 105514 [žiūrėta 2023-05-05]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: [10.1016/j.jobbe.2022.105514](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105514).
 21. MADRID, M., ORBE, A., CARRÉ, H. and GARCÍA, Y. Thermal Performance of Sawdust and Lime-Mud Concrete Masonry Units. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2018, **169**, 113-123 [žiūrėta 2023-04-26]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.193>.
 22. AHMED, W. Effective use of Sawdust for the Production of Eco-Friendly and Thermal-Energy Efficient Normal Weight and Lightweight Concretes with Tailored Fracture Properties. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus].2018, **184**, 1016-1027 [žiūrėta 2023-03-01]. ISSN 0959-6526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.009>.
 23. AHMED, A.T.M.F. Hemp as a Potential Raw Material Toward a Sustainable World: A Review. *Heliyon* [interaktyvus].2022, **8**, e08753 [žiūrėta 2023-05-04]. ISSN 2405-8440. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08753>.
 24. YADAV, M. and SAINI, A. Opportunities & Challenges of Hempcrete as a Building Material for Construction: An Overview. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus].2022, **65**, 2021-2028 [žiūrėta 2023-03-01]. ISSN 2214-7853. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.576>.
 25. SASSONI, E. Novel Sustainable Hemp-Based Composites for Application in the Building Industry: Physical, Thermal and Mechanical Characterization. *Energy and Buildings* [interaktyvus].2014, **77**, 219-226 [žiūrėta 2023-05-18]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.033>.
 26. WALKER, R. and PAVÍA, S. Moisture Transfer and Thermal Properties of Hemp–lime Concretes. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2014, **64**, 270-276 [žiūrėta 2023-05-14]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081>.
 27. SÁEZ-PÉREZ, M.P., BRÜMMER, M. and DURÁN-SUÁREZ, J.A. A Review of the Factors Affecting the Properties and Performance of Hemp Aggregate Concretes. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus].2020, **31**, 101323 [žiūrėta 2023-05-04]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101323>.
 28. DEL VALLE-ZERMENO, R. Preliminary Study of the Mechanical and Hygrothermal Properties of Hemp-Magnesium Phosphate Cements. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2016, **105**, 62-68 [žiūrėta 2023-05-04]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.081>.
 29. AL-KHEETAN, M.J. Performance Improvement of Hemp-Shiv Cementitious Composites through Hot Water and Steam Treatment. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2023, **367**, 130315 [žiūrėta 2023-05-06]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130315>.

30. STELLA MARY, F., NITHAMBIGAI, G. and RAMESHWARAN, P.M. Effect of Binders and Hemp Fibre in Concrete. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus].2021, **46**, 3791-3794 [žiūrėta 2023-03-05]. ISSN 2214-7853. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.029>.
31. BENFRATELLO, S. Thermal and Structural Properties of a Hemp–lime Biocomposite. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2013, **48**, 745-754 [žiūrėta 2023-05-05]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>.
32. GOURLAY, E. Effect of Water Content on the Acoustical and Thermal Properties of Hemp Concretes. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2017, **139**, 513-523 [žiūrėta 2023-05-05]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.018>.
33. COLLET, F. and PRETOT, S. Thermal Conductivity of Hemp Concretes: Variation with Formulation, Density and Water Content. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2014, **65**, 612-619 [žiūrėta 2023-05-06]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>.
34. KINNANE, O. Acoustic Absorption of Hemp-Lime Construction. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2016, **122**, 674-682 [žiūrėta 2023-05-08]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106>.
35. DEGRAVE-LEMEURS, M., GLÉ, P. and HELLOUIN DE MENIBUS, A. Acoustical Properties of Hemp Concretes for Buildings Thermal Insulation: Application to Clay and Lime Binders. *Construction and Building Materials* [interaktyvus].2018, **160**, 462-474 [žiūrėta 2023-05-09]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064>.
36. SHANMUGAM, V. Circular Economy in Biocomposite Development: State-of-the-Art, Challenges and Emerging Trends. *Composites Part C: Open Access* [interaktyvus].2021, **5**, 10-18 [žiūrėta 2023-03-16]. ISSN 2666-6820. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100138>.
37. VAZQUEZ-NUNEZ E, AVECILLA-RAMIREZ A, VERGARA-PORRAS B and LOPEZ-CUELLAR M. Green Composites and their Contribution Toward Sustainability: A Review. *Polymers and Polymer Composites* [interaktyvus].2021, **29**, 1588-1608 [žiūrėta 2023-03-16]. ISSN 0967-3911. Prieiga per: <https://doi.org/10.1177/0967391121100937>.
38. BHARATH, K.N. and BASAVARAJAPPA, S. Applications of Biocomposite Materials Based on Natural Fibers from Renewable Resources: A Review. *Science and Engineering of Composite Materials* [interaktyvus].2016, **23**, 123-133 [žiūrėta 2023-05-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1515/secm-2014-0088>.
39. FARHAN, M., MASTURA, M.T., ANSARI, S.P., MUAZ, M., AZEEM, M., SAPUAN, S.M. Advanced Potential Hybrid Biocomposites in Aerospace Applications: A Comprehensive Review. *Advanced Composites in Aerospace Engineering Applications* [interaktyvus].2022, 127-148 [žiūrėta 2023-05-08]. ISSN 978-3-030-88192-4. Prieiga per: https://doi.org/10.1007/978-3-030-88192-4_6.
40. Cetrīs. [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2023-03-16]. Prieiga per: <https://cetrīs.lt/ploksciū-cetrīs-savybės/>.
41. Durisol Blokėliai. [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-10]. Prieiga per: <https://www.durisolisgroup.lt/>.
42. Arbolito Blokėliai - Trūkumai, Pranašumai Ir Savybės . [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-10]. Prieiga per: <https://techno.expertexpro.com/lt/stroitelnye-materialy/223-arbolitovye-bloki-nedostatki-dostoinstva-i-kharakteristiki.html>.
43. YADAV, M. and SAINI, A. Opportunities & Challenges of Hempcrete as a Building Material for Construction: An Overview. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus].2022, **65**, 2021-2028 [žiūrėta 2023-05-05]. ISSN 2214-7853. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.576>.
44. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13055-1:2004]Lengvieji betono, skiedinio ir injekcinio skiedinio užpildai. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
45. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST 1476.7:1997]Betono ir skiedinio užpildai: bandymo metodai: stiprumo nustatymas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 1997.

46. LIETUVOS RESPUBLINKOS APLINKOS MINISTERIJA. [STR 2.01.02:2016]Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas. Vilnius: Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, 2016.
47. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 16449:2014]Mediena ir medienos gaminiai. Biogeninio anglies kiekio medienoje ir virtimo anglies dioksidu skaičiavimas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2014.