



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Specialiais mineraliniais priedais apdorotų pjuvenų įtakos
cementinių kompozitinių medžiagų fizikinėms bei
mechaninėms savybėms tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Skirmantas Kolyčius

Projekto autorius

doc. Ignacio Villalon Fornes

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Specialiais mineraliniais priedais apdorotų pjuvenų įtakos
cementinių kompozitinių medžiagų fizikinėms bei
mechaninėms savybėms**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Skirmantas Kolyčius

Projekto autorius

doc. Ignacio Villalon Fornes

Vadovas

doc. Gediminas Stelmokaitis

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Skirmantas Kolyčius

**Specialiais mineraliniais priedais apdorotų pjuvenų įtakos
cementinių kompozitinių medžiagų fizikinėms bei
mechaninėms savybėms tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Skirmantas Kolyčius

Patvirtinta elektroniniu būdu



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: 6211EX008 Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija	
Baigiamojo projekto tema (tematika, lietuvių k.): Specialiai apdirbtų pjuvenų ir cemento kompozito savybių tyrimas	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-35 (2025-12-01)	
(lietuvių k.): Specialiais mineraliniais priedais apdorotų pjuvenų įtakos cementinių kompozitinių medžiagų fizikinėms bei mechaninėms savybėms tyrimas	
(anglų k.): Investigation on the Effect of Sawdust Treated with Special Mineral Additives on the Physical and Mechanical Properties of Cementitious Composites	
Pradiniai duomenys darbui:	
Kita papildoma su užduotimi susijusi informacija (pagal poreikį):	
Atlikti:	Baigiamojo projekto dalys:
☒	Įvadas
☒	Literatūros apžvalga
☒	Metodologija
☒	Eksperimentiniai tyrimai
☐	Analitiniai tyrimai
☐	Skaitiniai tyrimai
☐	Ekonominė dalis
☒	Išvados
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo suderinimas su baigiamojo darbo vadovu:	
☒	Leidžiama
☐	Draudžiama
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo sąlygos (jei leidžiama), laikantis Universitete nustatytos GDI etiško naudojimo tvarkos:	
Leidžiama naudoti kaip pagalbinę priemonę laikantis akademines etikos, DI etiško naudojimo tvarką, laikantis bibliotekos nurodytų citavimo reikalavimų. Pvz: teksto gramatikos bei stiliaus taisymui (niekada paties teksto generavimui ir visada išsaugojant originalią versiją, kuri nebuvo dirbtinio intelekto redaguota), pradinei informacijos paieškai ir panašiai	

Konsultacijų laikas (su vadovu ir/ar konsultantu suderintas kassavaitinis konsultacijų laikas, kuris įvedamas į AIS, nurodant studento vidinį vidko kodą):

Vadovas:	doc. Ignacio Villalon Fornes
(indėlis 100 %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Konsultantas:	-
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Socialinis partneris:	-
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Skirmantas Kolyčius
	<i>vardas, pavardė</i>
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Kolyčius, Skirmantas. Specialiais mineraliniais priedais apdorotų pjuvenų įtakos cementinių kompozitinių medžiagų fizikinėms bei mechaninėms savybėms tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / doc. dr. Ignacio Villalon Fornes; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: cementas, pjuvenos, kompozitas, cheminis apdirbimas, mineraliniai priedai.

Kaunas, 2026. 48 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe nagrinėjama naujų specialiais mineraliniais priedais apdorotų pjuvenų ir cemento kompozitų savybės. Ši tema aktuali dėl griežtinamų tvarumo reikalavimų statybai, didėjančio poreikio naudoti atsinaujinančias medžiagas, bei siekio mažinti neigiamą statybų sektoriuje keliamą poveikį gamtai. Magistro baigiamojo darbo tikslas – išnagrinėti kaip medžio pjuvenų išankstinis apdorojimas daro įtaką cementinių kompozitinių medžiagų fizinėms bei mechaninėms savybėms ir palyginti tris skirtingus medžio dalelių cheminius apdirbimo būdus. Darbe keliami uždaviniai: Nustatyti medžio pjuvenų apdorojimo įtaką mechaninėms kompozito savybėms, įvertinti, kaip minėti apdirbimai daro įtaką kompozito vandens įmirkio savybėms, nustatyti kuris kompozito bandinys pasižymi geriausiomis šilumos laidumo savybėmis ir palyginti kompozitų gamybos proceso metu išskiriamą CO₂ emisijų kiekį.

Tyrimo metu atliekama literatūros analizė, išsiaiškinamos cementinių medžiagų neigiamą įtaka aplinkai bei nustatomos cemento ir medžio pjuvenų kompozito savybės ir kaip cheminis medžio pjuvenų apdirbimas daro įtaką kompozito savybėms. Atliekami eksperimentiniai tyrimai, kuriuo metu nustatomi suformuotų cemento ir mineraliniais priedais apdorotų medžio pjuvenų kompozitinių bandinių tankį, gniuždymo stiprio, lenkimo stiprio, vandens įmirkio, šilumos laidumo savybės bei apskaičiuojamas CO₂ pėdsakas. Bandymai atliekami remiantis LST EN standartais.

Palyginus eksperimentinio tyrimo rezultatus gauta, kad medžio pjuvenų specialiais mineraliniais priedais apdirbimas turi įtakos kompozito savybėms. Tačiau kontrolinio mišinio stiprumo pasiekti nepavyko. Geriausias mechanines savybės pasiekė bandiniai su natrio hidroksido, kalcio hidroksido, silicio dioksido ir metakaolino deriniu, apie 46 % didesnis gniuždymo stipris ir apie 17% didesni lenkimo stipri, mažesnis vandens įmirkis apie 36 % lyginant su kitais mineralinių priedų apdirbimo deriniais. Geriausias šilumos laidumo savybės pasiekė bandiniai su natrio silikato ir fosfogipso deriniu, net 0,185 W/mK. Tai parodo, kad chemiškai apdorotų medžio pjuvenų ir cemento kompozitas gali būti konkurencingas pakaitalas mažiau ekologiškiems rinkoje paplitusiems produktams.

Kolyčius, Skirmantas. Investigation on the Effect of Sawdust Treated with Special Mineral Additives on the Physical and Mechanical Properties of Cementitious Composites. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Ignacio Villalon Fornes; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology

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

Keywords: cement, sawdust, composite, chemical processing, mineral additives.

Kaunas, 2026. 48 pages.

Summary

This Master's thesis investigates the properties of novel cement – sawdust composites in which wood sawdust is treated with special mineral additives. The topic is relevant in the context of increasingly stringent sustainability requirements in construction, the growing demand for renewable materials, and the objective of reducing the negative environmental impact of the construction sector. The aim of the thesis is to examine how the pre – treatment of wood sawdust affects the physical and mechanical properties of cement-based composite materials and to compare three different chemical treatment methods for wood particles. The objectives of the study are: to determine the influence of wood sawdust treatment on the mechanical properties of the composite; to evaluate how these treatments affect the water absorption properties of the composite; to identify which composite specimen exhibits the best thermal conductivity properties; and to compare the amount of CO₂ emissions generated during the production process of the composite.

The research includes a literature review to identify the negative environmental impact of cement-based materials and to define the properties of cement – wood sawdust composites, as well as to assess how chemical treatment of wood sawdust influences composite performance. Experimental investigations are conducted to determine the density, compressive strength, flexural strength, water absorption, and thermal conductivity of the formed cement composites containing mineral – additive – treated wood sawdust, and to calculate their CO₂ footprint. All tests are carried out in accordance with LST EN standards.

A comparison of the experimental results shows that treatment of wood sawdust with special mineral additives significantly affects the properties of the composite. However, the strength of the control mixture was not achieved. The best mechanical properties were obtained in specimens treated with a combination of sodium hydroxide, calcium hydroxide, silicon dioxide, and metakaolin, resulting in approximately 46% higher compressive strength, about 17% higher flexural strength, and around 36% lower water absorption compared to other mineral additive treatment combinations. The best thermal conductivity was achieved by specimens treated with a combination of sodium silicate and phosphogypsum, reaching 0,185 W/mK. These results demonstrate that cement composites incorporating chemically treated wood sawdust can be a competitive alternative to less environmentally friendly products currently available on the market.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros analizė.....	13
1.1. Betono naudojimas	13
1.2. Medžio dalelių ir cemento kompozito savybės	14
1.3. Apdirbimas vandeniui.....	15
1.4. Medžio dalelių cheminis apdirbimas.....	15
1.4.1. Apdorojimas NH tirpalu	15
1.4.2. Apdorojimas GK tirpalu	16
1.4.3. Apdorojimas SS tirpalu	17
1.4.4. Apdorojimas natrio hipoclorito NaOCl tirpalu.....	18
1.4.5. Apdorojimas SD mikrodulkėmis ir MK	18
1.4.6. Apdirbimas sulfatais	19
1.5. Literatūros apžvalgos išvados.....	20
2. Medžiagos ir metodai	21
2.1. Tyrime naudotos medžiagos.....	21
2.2. Tyrimo eiga	23
2.3. Bandinių formavimas	25
2.4. Tyrimo metodai	26
2.4.1. Medžio pjūvenų paruošimas.....	26
2.4.2. Normalios konsistencijos bandymas	26
2.4.3. Tankio, gniuždymo ir lenkimo stiprio nustatymas	27
2.4.4. Vandens įmirkimo nustatymas	28
2.4.5. Šilumos laidumas nustatymas.....	28
2.5. CO ₂ pėdsako skaičiavimai	29
2.6. Tyrimo patikimumas ir validacija	29
3. Rezultatai ir diskusija	31
3.1. Kompozitų tankis.....	31
3.2. Kompozitų gniuždomasis stipris	32
3.3. Kompozitų lenkiamasis stipris	33
3.4. Vandens įmirkis.....	35
3.5. Šilumos laidumas.....	36
3.6. CO ₂ pėdsako įvertinimas	37
4. Išvados	42
DI naudojimo deklaracija	43
Literatūros sąrašas	44
Priedai.....	49
1 priedas. PRISMA diagrama.....	49
2 priedas. Tyrimo literatūros apžvalgos protokolai.....	50
3 priedas. Tyrimo dizaino diagrama	52

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Cemento mechaninės ir fizikinės savybės.....	21
2 lentelė. Cemento cheminė sudėtis	21
3 lentelė. Medžio pjuvenų charakteristikos.....	21
4 lentelė. SS tirpalo savybės.....	22
5 lentelė. GK tirpalo sudėtis ir savybės.....	22
6 lentelė. SD mikrodulkių sudėtis ir savybės	22
7 lentelė. NH sudėtis ir savybės	23
8 lentelė. Bandinių sudėtis 1m ³ kompozito	24
9 lentelė. Tirpalų sudėtis	26
10 lentelė. Bandinių mišinio ruošimo seka	29
11 lentelė. Bandinių su 35% pjuvenų kiekiu bandymų rezultatai	40
12 lentelė. Bandinių su 35% pjuvenų kiekiu bandymų rezultatų normalizuotos vertės	41

Paveikslų sąrašas

1 pav. Cemento gamybos kiekis nuo 2010 iki 2024 [2].....	13
2 pav. Tyrimo eiga	23
3 pav. Pjuvenų apdirbimo mišinys SS+GK (a), NH+GK (b), SS (c).	25
4 pav. Bandinių mišinio ruošimo seka	25
5 pav. Viko prietaisas [46]	27
6 pav. Normalios tešlos konsistencijos nustatymo bandymas	27
7 pav. Lenkimo bandymas	28
8 pav. Gniuždymo bandymas.....	28
9 pav. Šilumos srauto matuoklis [52].....	28
10 pav. Tankių rezultatai.....	31
11 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai po 7 dienų (a), po 14 dienų (b), po 28 dienų (c)	33
12 pav. Lenkimo stiprio rezultatai po 7 dienų (a), po 14 dienų (b), po 28 dienų (c).....	35
13 pav. Vandens įmirkimo bandymo rezultatai	36
14 pav. Šilumos laidumo bandymo rezultatai	37
15 pav. CO ₂ emisijų kiekis su vidutinėmis gniuždymo stiprio reikšmėmis (a) ir vidutinėmis lenkimo stiprio reikšmėmis (b).....	38

Įvadas

Šis tiriamasis darbas skirtas medžio pjuvenų ir cemento kompozitų potencialo įvertinimui, siekiant sumažinti tradicinės statybos sektoriaus sukeltą aplinkosaugos ir išteklių vartojimo problemą. Tradiciškai statybų industrijoje plačiai naudojamas betonas, gaminamas iš didelių kiekių mineralinių žaliavų, o tuo pačiu kaupiasi ir nepakankamai panaudojamos medžio atliekos, kurios dažnai tampa atliekų tvarkymo ir sąvartyno problemos dalimi. Augantis pastatų ir infrastruktūros poreikis kartu su intensyviu gamtos išteklių naudojimu skatina ieškoti tvarių alternatyvų, kurios leistų efektyviau panaudoti turimus išteklius ir sumažinti aplinkos taršą.

Aptariant medžio atliekoms ir betono gamybai būdingas problemas, reikia pažymėti, kad intensyvus betono naudojimas lemia didelį išteklių poreikį, energijos sąnaudas ir CO₂ emisijas, o kartu su medžio atliekų kaupimu atsiranda papildomų aplinkosaugos iššūkių. Todėl tiriant ir diegiant naujas medžio pjuvenų apdorojimo technologijas, kurios padėtų sumažinti atliekų kiekį bei išteklių sunaudojimą statybų sektoriuje, atsiveria galimybė pasiekti tvaresnį ir ekonomišką statybų procesą.

Planuojama tyrimo kryptis – mechaniniu bei chemiškai apdorotų medžio pjuvenų integravimas į cemento kompozitus – atveria naujas perspektyvas tvarios statybos srityje. Siekiant užtikrinti, kad kompozitas, paruošta su organinėmis medžiagomis, būtų ilgaamžis, reikalingas papildomas apdorojimas. Literatūroje pastebima, kad dažniausiai medžio dalelių cheminiam apdorojimui naudojama viena ar dvi skirtingos cheminės medžiagos, todėl planuojamas tyrimas, kuriame lyginami trys skirtingi apdorojimo metodai, siekiant pagerinti medžio pjuvenų savybes ir užtikrinti geresnę sąveiką su cemento matrica. Pirmasis metodas remiasi kalcio hidroksido Ca(OH)₂ (GK) ir natrio silikato Na₂SiO₃ (SS) derinio naudojimu, kuris gali padidinti pjuvenų atsparumą neigiamoms sąlygoms bei pagerinti jų fizines savybes. Antrajame metode taikoma dviejų medžiagų mišinys, kurioje naudojami SS ir fosfogipsas CaSO₄ (FG) – ši kombinacija gali skatinti neorganinių junginių sintezę, sumažinti pjuvenų poringumą ir padidinti kompozito stiprumą. Trečiasis metodas orientuotas į dar kompleksiškesnį požiūrį, kuriame pjuvenos yra apdorojamos naudojant GK, silicio dioksidą SiO₂ (SD), metakaoliną Al₂Si₂O₇ (MK) ir natrio hidroksidą NaOH (NH), šiuo mišiniu siekiama atlikti cheminių reakcijų ciklą, kuris galėtų pagerinti tiek medžio pjuvenų paviršiaus savybes, tiek jų integraciją į cemento struktūrą.

Šiame darbe bus atliekami mechaniniai ir fizikiniai tyrimai, siekiant išanalizuoti, kaip skirtingi pjuvenų apdorojimo metodai paveikia medžio pjuvenų ir cemento kompozitų savybes, ilgaamžiškumą bei mechaninį atsparumą. Gautos žinios leis įvertinti galimą naujų, mažiau resursų reikalaujančių ir aplinkai draugiškų statybos medžiagų panaudojimo perspektyvas, prisidedant prie žiedinės ekonomikos principų įgyvendinimo statybų sektoriuje.

Darbo tikslas – išnagrinėti kaip medžio pjuvenų išankstinis apdorojimas daro įtaką cementinių kompozitinių medžiagų fizinėms bei mechaninėms savybėms ir palyginti tris skirtingus medžio dalelių cheminius apdirbimo būdus.

Darbo uždaviniai:

Pagaminti kompozitų su penkis skirtingais medžio dalelių apdirbimo būdais, bandinius ir nustatyti apdirbimo daromą įtaką

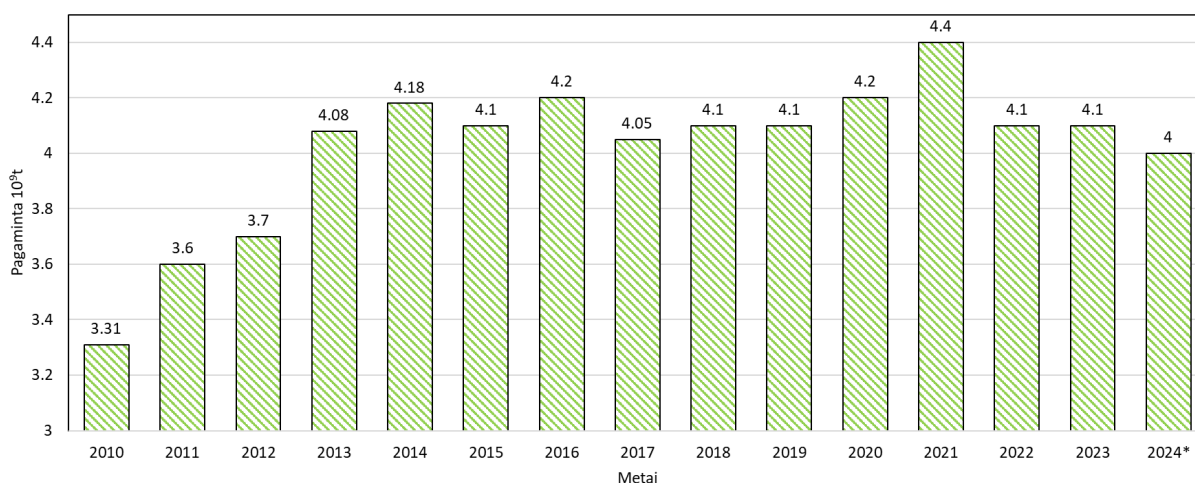
1. Nustatyti medžio pjuvenų apdorojimo įtaką mechaninėms kompozito savybėms

2. Įvertinti, kaip medžio pjuvenų apdirbimas daro įtaką kompozito vandens įmirkio savybėms.
3. Nustatyti kuris kompozito bandinys pasižymi geriausiomis šilumos laidumo savybėmis.
4. Paskaičiuoti ir palyginti kompozitinių bandinių gamybos proceso metu išskiriamą CO₂ emisijų kiekį.
5. Bendrai įvertinti viso tyrimo rezultatus ir nustatyti geriausią medžio pjuvenų apdorojimo metodą.

1. Literatūros analizė

1.1. Betono naudojimas

Betonas vis dar išlieka labiausiai naudojama statybinė medžiaga pastatų ir infrastruktūrinių objektų statyboje [1]. Didėjanti betono paklausa kelia nerimą kalbant apie aplinkosaugą ir neigiamą įtaką gamtai. Betono rišamoji medžiaga cementas, kurio 2023 metais buvo pagaminta 4,1 milijardai tonų [2], cemento gamybos procesas į atmosferą kasmet išleidžia apie 1,6 milijonų tonų anglies dioksido dujų. Apie 60 % visų CO₂ emisijų cemento gamyboje susidaro dėl kalcio karbonato CaCO₃ skaidymo į kalcio oksidą CaO, o likusi dalis – dėl degalų deginimo klinkerio krosnyse [3] [4]. Prognozuojama, kad iki 2050 metų gaminamo produkto kiekis gali padidėti iki 4,38 milijardų tonų per metus [5]. Toks masyvus betono naudojimas ne tik didina anglies dvideginio emisijas, bet ir sparčiai naudoja natūralius išteklius - smėlį, žvyrą ir skaldą [6]. Atsižvelgiant į statistinius duomenis, pateiktus 1 paveikslėlyje [2], matoma, kad per pastaruosius ketverius metus įžvelgiamas šioks toks gamybos sustojimas ar net sumažėjimas. Šį sumažėjimą galima paaiškinti vis labiau griežtinančiais įstatymais susijusiais, su naujų pastatų statyba.



1 pav. Cemento gamybos kiekis nuo 2010 iki 2024 [2]

2024 metų lapkričio 1 dieną įsigaliojo nauji Lietuvos Respublikos statybos reikalavimai visuomeninių pastatų statybai. Pasak naujo įstatymo, visuomeninių pastatų konstrukcijos ir medžiagos turės būti sudarytos iš ne mažiau kaip 50 % organinės kilmės statybinių medžiagų [7]. Šio įstatymo tikslas – mažinti anglies dioksido emisiją bei skatinti aplinkai nekenksmingą statybą. Panašios iniciatyvos diegiamos ir kitose šalyse – Skandinavijos valstybės aktyviai remia medinių konstrukcijų projektus [8], o Europos Sąjunga skatina žiedinės ekonomikos principų taikymą statyboje [9]. Tikėtina, kad iki tam tikro lygio betono ir plieno pakaitalas bus mediena. Tačiau pasiekus medienos mechaninius ir fizinius limitus atsiranda poreikis naujų statybinių medžiagų paieškoms. Atsižvelgiant į augantį spaudimą mažinti CO₂ emisijas, vis daugiau dėmesio skiriama antrinių žaliavų, tokių kaip medienos pramonės atliekos – pjuvenos – panaudojimui statybiniuose kompozituose [10, 10, 11, 10, 11, 12, 10, 11, 12, 13, 10, 11, 12, 13, 14].

Atsižvelgiant į augančius aplinkosauginius reikalavimus ir ribotus natūralių išteklių kiekius, būtina ieškoti alternatyvių, mažiau taršių medžiagų, kurios galėtų iš dalies pakeisti įprastą betoną arba pagerinti jo poveikį aplinkai, išlaikant ar net gerinant mechanines savybes

1.2. Medžio dalelių ir cemento kompozito savybės

Tyrinėtojai ieško naujų alternatyvių statybinių medžiagų. Mokslininkai dažnai siekia pagerinti medžiagos eksploatacines, mechanines, šilumines savybes, sumažinti svorį ir padidinti patvarumą. Tačiau, vis didesnę dėmesį skiriant tvarumui bei anglies dioksido pėdsako mažinimui, atsiranda poreikis kurti naujas statybines medžiagas, kurios būtų mažiau kenksmingos aplinkai. Vienas iš plačiai tyrinėjamų klausimų yra antrinis atliekų ar šalutinių produktų panaudojimas, tokių kaip plastikas, padangos, medžio pjuvenos ir kt. [15]. Viena iš plačiai tiriamų alternatyvių medžiagų yra cemento ir medžio dalelių kompozitai, kurie potencialiai gali būti naudojami kaip šilumos izoliacija, ar net konstrukcinis elementas [16]. Juarez'as-Alvarado'as ir kt. [17] stebėjo medžio drožlių ir cemento kompozito šilumos laidumo savybes. Bandymo rezultatai parodė, kad mažėjant kompozito tankiui, lygiagrečiai mažėja ir medžiagos šilumos laidumas. Užfiksuotas šilumos laidumas $0,4 \text{ W/(mK)}$ lyginant su kontroliniu bandiniu šilumos laidumas sumažėjo 43 %. Šilumos laidumo sumažėjimas pastebimas dėl natūralių medžio pjuvenų savybių. Įkomponuojant pjuvenas, kompozito struktūroje atsiranda didelis kiekis porų ir mažėja tankis. Atsiradusias poras užpildo oras, kuris yra labai geras šilumos izoliatorius. Olugbenga ir kt. [18] tyrė medžio atliekų ir cemento kompozitą, gniuždymo bandymo rezultatai bandinio su 25 % medžio pjuvenomis parodė 14,15 MPa gniuždymo stiprį, tai beveik atitinka M15 markės mūro blokelių stiprį [19]. Pagal pateiktus rezultatus matoma didelė perspektyva kompozito panaudojimui vietoje tradicinių mūro plytų ar blokelių. Taip pat lyginant su tradiciniu mūru, kaip silikato plytos ar blokeliai, matoma, kad medžio pjuvenų ir cemento kompozitas turi ganėtinai mažą šilumos laidumą.

Tačiau medžio dalelių ir cemento kompozitai turi ir neigiamų savybių. Didžioji dalis mokslinių straipsnių rezultatų parodė didelį gniuždomojo stiprio sumažėjimą. Al-Kaseasbeh'as ir Al-Qaralleh'as [20] tyrimas parodė, kad medžio dalelių apdorojimas silanu, 65,5 % sumažino gniuždomojo stiprio reikšmę. Panašius rezultatus gavo Khelifi'is ir kt. [21], kurių tyrimo rezultatai parodė, kad pjuvenų apdirbimas kalkėmis sumažino kompozito stiprumą nuo 35 % iki 52 %. Mažiausią gniuždomojo stiprio sumažėjimą užfiksavo Sharba ir kt. [22] savo tyrime, kuriame medžio dalelių apdirbimas vykdomas mirkant natrio silikato tirpale, stiprumo sumažėjimas svyravo nuo 4 % iki 24,7 %. Taip pat pastebimas didelis vandens įgeriamumas, Al-Kaseasbeh'as ir Al-Qaralleh'as [20] pastebėjo net 300 % padidėjusį vandens įgeriamumą. Būtina pabrėžti, kad bandymai buvo atlikti su neapdirbtomis medžio pjuvenomis. Batool'as ir kt. [23] ir Nomai'as ir kt. [24] taip pat pastebėjo, kad pridėjus medžio dalelių į kompozito mišinį, drastiškai sumažėja mišinio slankumas. Mišinio slankumo skirtumas tarp bandinio su 10 % ir 60 % medžio dalelių, siekia beveik 85 %. Ahmed'as ir kt. [25] papildomai apskaičiavo medžio pjuvenų vandens įgeriamumą, kad atitinkamai galėtų patikslinti kompozito sudedamųjų dalių proporciją. Taip pat viena pagrindinių problemų, susijusių su pjuvenų įkomponavimu į kompozitus, yra sunkus tarpusavio pjuvenų ir polimero sukibimo užtikrinimas. Dėl nepakankamo sukibimo medžio dalelės gali aglomeruotis, tai sukelia kompozito mechaninių savybių mažėjimą [24]. Remiantis nagrinėtais tyrimais, galima teigti, kad medžio dalelių ir cemento kompozitas pasižymi tam tikrais esminiais trūkumais, kurie kol kas riboja jo plačias pritaikymo galimybes. Šie trūkumai yra kritiškai svarbūs, todėl jų neišsprendus, medžiaga neturės galimybės būti naudojama masiškai. Literatūroje siūlomas vienas iš galimų sprendimų – medžio dalelių paviršiaus modifikacija, siekiant pašalinti minėtus defektus.

1.3. Apdirbimas vandeniu

Pjuvenų mirkymas vandenyje yra pats paprasčiausias apdirbimo metodas, kuris naudojamas siekiant išplauti pjuvenose esančius cheminius junginius kaip ligniną ir hemiceliuliozę. Šis metodas yra mažiau invazinis nei apdirbimas cheminiais mišiniais, tačiau vis tiek gali teigiamai paveikti kompozito savybes. Gloria ir kt. [26] savo tyrime naudojo karšto vandens plovimo pjuvenų apdorojimą. Pjuvenos buvo mirkomos vieną valandą karštame (80 °C) vandenyje. Toks apdirbimas padėjo medžio dalelių ir cemento suderinamumui. Panašius rezultatus gavo ir Dias'as ir kt. [27], kurie išsiaiškino, jog pjuvenų apdirbimas šaltu ir šiltu vandeniu pagerina cemento hidratacijos procesą.

1.4. Medžio dalelių cheminis apdirbimas

Medžio dalelės apdirbamos įvairiais būdais, tačiau dažniausiai literatūroje aptinkamas būdas yra mirkymas tam tikruose mišiniuose. Šis apdirbimo būdas leidžia pjuvenom efektyviai įsisavinti tirpaluose esančias chemines medžiagas.

1.4.1. Apdorojimas NH tirpalu

NH naudojamas siekiant sumažinti ligninų, hemiceliuliozės kiekį medžio pjuvenose. Apdirbimo proceso metu skaidomos medžio dalelių sudedamosios dalys, kurios gali neigiamai veikti cemento kompozito savybes.

Dažniausiai literatūroje aptinkamas apdirbimas – mirkymas NH tirpale. Priya ir kt. [28] užtikrino, kad apdirbamos pjuvenos būtų vienodo dydžio, persijodama jas per 1,18 mm sietą. Taip pat, siekiant pašalinti nenorimas priemaišas, pjuvenos prieš apdirbimą dar sijojamos per 10 ir 20 dydžio sietus. Po mechaninio apdirbimo pjuvenos mirkomos 1 %, 3 % ir 5 % koncentracijos NH tirpale, maišant kambario temperatūroje. Po mirkymo pjuvenos nuplaunamos ir išdžiovinamos 70 °C temperatūroje. Apdorotų pjuvenų cheminė analizė parodė, kad jų sudėtį sudaro 34,58 % SD, tai yra pagrindinis smėlio komponentas, vadinasi, pjuvenos gali būti naudojamos vietoj smulkių užpildų, tokių kaip smėlis.

Hossain'as ir kt. [29] atliktame tyrime buvo analizuojamas šarminio apdorojimo poveikis medžio pjuvenoms, surinktoms iš vietinių Bangladešo medžių rūšių. Naudotos skirtingo stambumo dalelės, kurių dydis svyravo nuo 250 µm iki 500 µm. Kiekvienas pjuvenų tipas buvo apdorotas atskirai, naudojant 10 % NH tirpalą, kuriame jos buvo laikomos maždaug vieną valandą ir trisdešimt minučių kambario temperatūroje. Vėliau pjuvenos buvo skalaujamos distiliuotu vandeniu, kol pasiektas neutralus pH (apie 7,0), ir džiovinamos 110 °C temperatūroje. Tyrimo rezultatai parodė, kad medžio dalelių apdirbimas pagerina kompozito tempimo stiprį. Autorius teigia, kad tokie rezultatai galimi dėl apdirbimu NH tirpalu, kurio metu yra gerinamas medžio dalelių paviršiaus sukibimas su matrica ir iš dalies pašalina silpnąją ligninų dalį nuo medžio dalelių.

Priya ir kt. [30] savo tyrime siekė nustatyti efektyviausią natrio hidroksido koncentraciją, taikomą medžio pjuvenų apdorojimui, skirtam didelio tankio pjuvenų ir polipropileno kompozitų gamybai. Skirtingai nei ankstesniuose tyrimuose, šio darbo autoriai dirbo su mišriomis pjuvenomis, surinktoms iš įvairių vietinių medienos apdirbimo įmonių. Siekiant išgauti vienodesnę medžiagą, pjuvenos buvo sijojamos iki 1,25 µm dalelių dydžio. Prieš šarminį apdorojimą jos buvo nuplaautos distiliuotu vandeniu ir išdžiovinamos 65 °C temperatūroje, siekiant pašalinti paviršiaus nešvarumus ir sumažinti eksperimento netikslumą. Toliau pjuvenos buvo dvi valandas mirkomos į 1 %, 3 %, 5 % ir

7 % koncentracijos NH tirpalus. Po apdorojimo pjuvenos buvo neutralizuojamos acto rūgštimi ir vandeniui, o galiausiai džiovinamos 70 °C temperatūroje tris paras. Rezultatai parodė, kad šarminis apdirbimas gali keisti medžio pjuvenų morfologiją, padidinti kristalinę struktūros dalį ir sumažinti amorfinį komponentų kiekį, kad yra svarbu kompozito su cementu vientisumui ir patikimumui.

Morjène ir kt.[31] tyrimo metu taikė šarminį medienos dalelių apdorojimo būdą, siekdami pagerinti jų suderinamumą su cementine matrica. Medienos dalelės buvo apdorojamos panardinant jas į 3,8 % NH tirpalą, palaikant medžio dalelių ir tirpalo santykį 1:20 (masės-tūrio). Apdorojimas vyko esant šarminiam pH, kuris siekė 12 ir padidintoje temperatūroje iki 80 °C vieną valandą, o po to skaidulos nuplautos distiliuotu vandeniu. Apdirbtos medžio dalelės, kurių skersmuo nesiekė 40 µm, buvo džiovinamos 80 °C temperatūroje vieną parą. Vertinant rezultatus, pastebėta, kad NH apdorotų dalelių įsitvirtinimas cementiniame kompozite lėmė žymų mechaninių savybių pagerėjimą. Gniuždomasis stipris padidėjo nuo 9,81 MPa iki 18,41 MPa, t. y. apie 46,7 % lyginant su neapdorotų medžio dalelių kompozitu. Gniuždymo stiprio didėjimas susietas su pagerėjusiu sukibimu tarp medžio dalelių ir portlandcemenčio bei sumažėjusiu laisvo NH kiekiu. Cheminis apdorojimas efektyviai pašalina cukrus, hemiceliuliozę bei kitas medžiagas, kurios trukdo cemento hidratacijai ir silpnina kompozito struktūrą.

Liu ir kt. [32] siekė ištirti, kaip apdorojimas skirtingos koncentracijos šarminiu NH tirpalu veikia medienos pjuvenų cheminę sudėtį, jų struktūrines savybes ir sąveiką su cemento matrica. Savo tyrime medienos pjuvenas apdribo šarminiu būdu, kaitinant jas 160 °C temperatūroje NH tirpaluose, kurių koncentracija kito nuo 2 % iki 8 %. Po dviejų valandų mirkymo, pjuvenos išimtos ir kruopščiai nuplautos iki neutralaus pH ir išdžiovinotos. Atliktoje analizėje matoma, kad šarminis apdorojimas veiksmingai pašalina hemiceliuliozę, ligniną ir kitas medžiagas, kurios neigiamai veikia cemento hidrataciją. Konkrečiai hemiceliuliozės kiekis sumažėjo iki 15,61 %. O lignino – iki 4,59 %, tuo tarpu santykinis celiuliozės kiekis ir jos kristališkumas padidėjo atitinkamai 88 % ir 66 %. Tai ženkliai padidino medienos pjuvenų fizikines ir chemines savybes.

Apibendrinant galima teigti, kad apdorojimas NH tirpalu yra vienas iš efektyviausių metodų, gerinančių medžio dalelių sąveiką su cementine matrica. Šis apdorojimo metodas šalina medžio dalelėse esantį ligniną, hemiceliuliozę ir kitas nepageidaujamas organines medžiagas, pagerina paviršiaus savybes, padidina celiuliozės kiekį bei kristališkumą, dėl ko gerinamos kompozito mechaninės savybės. Neatsižvelgiant į technologinius skirtumus tarp tyrimų, apdorojimas NH tirpalu yra efektyvus apdorojimo metodas, kuris pagerina kompozito struktūrą ir eksploatacines savybes.

1.4.2. Apdorojimas GK tirpalu

Naudojant GK siekiama pagerinti sąveiką tarp medžio pjuvenų ir cementinės matricos

Said'as [33] savo tyrime taikė netradicinį pjuvenų cheminio apdirbimo metodą. Parinktas 20 % GK tirpalas. Šis tirpalas buvo naudojamas kaip pjuvenų valymo priemonė, siekiant pašalinti tuos junginius, kurie neigiamai veikia cemento hidrataciją ir kietėjimo procesą. Pradiniame etape, pavadintame I etapu, pjuvenos buvo sijoamos 6,3 mm sietu, po to vieną valandą verdamos GK tirpale. Toliau apdorotos pjuvenos buvo džiovinamos atvirame ore. Šis apdorojimas iš pjuvenų pašalina nenorimas medžiagas, kaip cukrūs, dervos, ligninai ir jo skilimo produktai bei pagerina pjuvenų savybes kaip užpildo, dėl to cemento ir pjuvenų kompozito gniuždomasis ir lenkiamasis stipris lyginant su neapdorotų pjuvenų kompozitu, vidutiniškai padidėjo 5,98 % ir 12,47 % atitinkamai. Bandymo rezultatai parodo, kad šis pjuvenų apdirbimas efektyviai pagerina galutinio

kompozito mechanines savybes. Kita vertus, rezultatai parodė, kad pjuvenų apdirbimas nedarė įtakos kompozito šilumos laidumui.

Quiroga'as ir kt. [34] taip pat naudojo GK tirpalą medžio dalelių apdirbimui ir siekė įvertinti apdirbimo poveikį medienos dalelių savybėms bei jų sąveikai su cemento matrica. Naudotas šarminės hidrolizės metodas atliekamas kambario temperatūroje, medžio daleles panardinant į skirtingos koncentracijos (0,56; 1,11; 2,22 %) GK tirpalus. Medžio dalelės laikomos 4, 24, 72 valandas. Autoriai darbe nepateikia, ar po mirkymo medžio dalelės buvo plaunamos ir džiovinamos. GK hidrolizė sėkmingai sumažino cemento hidratacijos slopinimą. Tačiau šie metodai taip pat turėjo reikšmingą poveikį tiek pačių medienos dalelių, tiek jų pagrindu suformuoto cemento kompozito mechaninėms savybėms. Buvo pastebėtas reikšmingas elastingumo modulio padidėjimas apdorotose medienos dalelėse, priklausomai nuo taikytų sąlygų. Taip pat pagerėjo ir kompozito mechaniniai rodikliai – elastingumo modulis bei gniuždymo stipris.

Apžvelgiant tyrimu duomenimis, pjuvenų apdorojimo GK tirpalu metodas šalina kenksmingus junginius, gerina pjuvenų struktūrines savybes bei užtikrina geresnę sąveiką su cemento matrica. Rezultatuose matomas kompozitų mechaninių savybių – ypač gniuždomojo stiprio ir elastingumo modulio – pagerėjimą. Nors GK reikšmingo poveikio šilumos laidumui neturėjo, apdirbimo įtaka kompozito struktūrai ir mechaniniam atsparumui yra reikšminga. Tai leidžia daryti išvadą, kad GK gali būti sėkmingai taikomos siekiant pagerinti cemento ir pjuvenų kompozitų savybes, priklausomai nuo numatomų eksploatacinių reikalavimų.

1.4.3. Apdorojimas SS tirpalu

SS tirpalu medžio pjuvenos impregnuojamos siekiant sustiprinti medžio pjuvenų daleles ir taip pat pagerinti jų sąveiką su cementine matrica.

Siddique'ė ir kt. [35] tyrė pjuvenų, kaip 5–20 % natūralaus smėlio pakaitalo betono mišiniuose, poveikį, analizuodami SS apdorotų ir vandeniui apdorotų pjuvenų mechanines savybes, palyginti su kontrolinio betono savybėmis. Apdorojant, pjuvenos pirmiausia buvo sijojamos per 4,75 mm dydžio sietą, po to 24 valandas atskirai apdorojamos vandeniui ir natrio silikatu. Apdirbimas pastebimos įtakos kompozito mechaninėms savybėms neturėjo, tačiau matomas mišinio slankumo padidėjimas. Małaszkievicz'us ir kt. [36] tyrė SS apdirbimo įtaką medžio dalelių atliekoms, siekdamas jas suderinti su cementine matrica. Medžio atliekų dalelės buvo mirkomos 12,5 % SS tirpale. Mirkymo procesas tęsėsi 24 valandas. Rezultatai parodė 6 % didesnę tankį, 58,6 % didesnę lenkimo stiprį ir net 90,6 % didesnę gniuždymo stiprį, lyginant su kontroliniu bandiniu. SEM mikroskopijos analizė parodė, kad medienos pluoštai buvo glaudžiai sujungti su cementine matrica. Tai rodo efektyvų ryšį tarp organinių medžiagų ir neorganinio rišiklio. C-S-H formavosi tiek ant medienos dalelių paviršiaus, tiek jų viduje. Nepastebėta portlandito kristalų, o tai gali reikšti, kad silicio dioksidas iš natrio silikato reagavo su portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ir sudarė papildomą C-S-H fazę, taip pašalindamas silpnąsias vietas cementinėje matricoje.

Apibendrinant galima teigti, kad pjuvenų apdorojimas SS tirpalu gali turėti įvairų poveikį kompozito savybėms, priklausomai nuo taikomo apdirbimo metodo ir medžiagų savybių. Nors Siddique'ė ir kt. tyrime reikšmingų teigiamų mechaninių savybių pokytis nebuvo pastebėtas, Małaszkievicz'us ir kt. gavo ženkliai geresnius rezultatus – padidėjusį stiprį, tankį ir pagerintą sąveiką tarp medienos dalelių ir cemento. Daroma prielaida, kad tinkamai parinkta cheminė medžiaga ir apdorojimo metodas gali daryti įtaką galutinėms kompozito mechaninėms savybėms. Tinkamas pjuvenų apdirbimas leidžia

sustiprinti kompozito struktūrą, formuoja papildomas C-S-H fazes bei pašalinama silpnuosius ryšius cementinėje matricoje.

1.4.4. Apdorojimas natrio hipochlorito NaOCl tirpalu

Hassen'as ir Hameed'as [37] ištyrė tris skirtingus cheminius pjuvenų, skirtų naudoti betono mišiniuose, apdorojimo procesus, kai apdorotų pjuvenų dedama nuo 10 % iki 50 %. Procesas prasidėjo nuo pjuvenų sijojimo per 2,36 mm dydžio sietą, kad būtų pasiektas tinkamas dydis tolesniam apdorojimui. Apdorojimas apėmė: 1) pjuvenų mirkymą 15 % natrio hipochlorito (NaOCl) tirpale be skalavimo ir 2) pjuvenų apdorojimą 15 % natrio hipochlorito (NaOCl) tirpalu, po to 24 val. panardinimą į vandenį ir džiovinimą. 15 % tirpalą sudarė 0,75 l NaOCl, sumaišyto su 1 kg pjuvenų. Vėliau apdorotų pjuvenų betono kompozitų mechaninės savybės buvo lyginamos su neapdorotų pjuvenų kompozitų mechaninėmis savybėmis, nes pridėtų pjuvenų kiekis visais apdorojimo būdais išliko vienodas. Rezultatai parodė, kad antru būdu apdirbtos ir plautos pjuvenos pasiekė 27,6 % didesnę gniuždomąją stiprį už neapdorotų pjuvenų kompozitą. Taip pat matomas 2 % tankio padidėjimas. Toks rezultatas pasiektas dėl natrio hipochlorito NaOCl stiprių oksidavimo savybių, dėl kurių skaldomos pjuvenų organinės priemaišos, tokios kaip ligninas, taninas ir cukrus. Pašalinus šias priemaišas, gerinamas cemento hidratacijos procesas, todėl susidaro daugiau C-S-H junginių. Pjuvenų plovimas po cheminio apdirbimo pašalina cheminio proceso metu susidariusią druskos rūgštį HCl, kuri neigiamai reaguoja su cementu.

Apibendrinant, Hassen'as ir Hameed'as tyrimas parodė, kad pjuvenų apdorojimas 15 % natrio hipochlorito tirpalu, po kurio seka plaunama vandeniui ir džiovinama, efektyviai pagerina betono kompozito mechanines savybes. Šiuo metodu pasiektas reikšmingas gniuždomojo stiprio (27,6 %) ir tankio (2 %) padidėjimas, lyginti su neapdorotomis pjuvenomis. Tai susieta su organinių priemaišų pašalinimu ir suaktyvinta cemento hidratacija, o plovimo etapas yra būtinas norint išvengti neigiamo HCl poveikio cementui.

1.4.5. Apdorojimas SD mikrodulkėmis ir MK

SD ir MK naudojamas padidinti kompozito tankį, kas tiesiogiai koreliuoja su geresnėmis mechaninėmis ir fizikinėmis savybėmis.

Khan'as ir kt. [38] tyrime nagrinėjama pjuvenų betono mechaninių savybių gerinimas naudojant SD mikrodulkes, MK ir marmuro miltelius. Tam, kad būtų užtikrintas vienodas dalelių dydis, išdžiovintos pjuvenos buvo sijojamos per sietą, pašalinant likusias stambias medienos dalis. Mokslininkai pataria, kad norint optimaliai sumaišyti betoną, pjuvenų dalelių dydis turėtų būti nuo 6,35 mm. Į 25 % pjuvenų betoną pridėjus SD mikrodulkių, gerokai padidėjo gniuždymo stipris. S25SF10 mišinio (25 % pjuvenų + 10 % SD mikrodulkių) gniuždymo stipris buvo didžiausias 21,22 MPa, t. y. net 68,8 % didesnis, palyginti su kontroliniu 25 % pjuvenų mišiniu (12,57 MPa). SD mikrodulkės, labai reaktyvus pucolanas, reaguoja su cemento hidratacijos metu išsiskiriančiu kalcio hidroksidu, susidarant papildomiems C-S-H (kalcio silikato hidrato) junginiams. Ši antrinė hidratacijos reakcija prisideda prie didesnio stiprumo ir ilgaamžiškumo, užpildydama pjuvenų dalelių susidariusias tuštumas. SD mikrodulkių dalelės yra labai smulkios, todėl užpildo betono mišinio tuštumas ir padidina tankį. Dėl to mikrostruktūra tampa tankesnė, sumažėja poringumas ir galiausiai padidėja stiprumas. Dėl didesnio tankumo taip pat pagerėja betono mišinio darbinės savybės. Adamu'us ir kt. [39] taip pat tyrė SD mikrodulkių įtaką betono kompozitui. Tyrime kaip cemento

pakaitalas buvo naudojama kalcio karbido atlieka, kuri susidaro kaip šalutinis produktas reaguojant kalcio karbidui (CaC_2) su vandeniu. 7,5 %, 15 %, 22.5% ir 30% cemento masės pakeičiama kalcio karbido atlieka. Taip pat pridedama 1 %, 2 %, 3 % ir 4% (cemento masės) SD mikrodulkių. Rezultatai parodė, kad šių priedų įkomponavimas, sumažina betono mišinio apdirbamumą, tačiau pagerina visas mechanines kompozito savybes, tokias kaip gniuždomasis, tempiamasis, lenkiamasis betono stipris. Analizuojant bandinių mikrostruktūrą, patvirtinamas teiginys, kad SD mikrodulkės ženkliai padidina struktūros tankį, sumažina poringumą ir išlaiko geras mechanines savybes.

Tyrimai rodo, kad SD mikrodulkės yra veiksmingas priedas, gerinantis cemento ir pjuvenų kompozito savybes. Veikdamos, kaip labai smulkus ir reaktyvus pucolanas, SD stiprina kompozito struktūrą formuodamas papildomus kalcio silikato hidratų (C-S-H), kurie užpildo kompozite esančias poras, taip mažinant poringumą ir didina tankį. Dėl to pagerėja ne tik mechaninės savybės – tokios kaip gniuždomasis, lenkiamasis ar tempiamasis stipris – bet ir betono ilgaamžiškumas. Nors SD mikrodulkės šiek tiek sumažina medžiagos apdirbamumą. Apdorojimo bendras poveikis mikrostruktūrai ir stiprumui yra teigiamas. Dėl to galima daryti išvadą, jog SD mikrodulkių naudojimas yra efektyvi priemonė kompensuoti organinių užpildų, tokių kaip pjuvenos, sukeltus trūkumus ir pagerinti bendrą kompozito kokybę.

1.4.6. Apdirbimas sulfatais

Cemento hidratacijoje dalyvauja skirtingos fazės – silikatinės (C_3S) ir aluminatinės (C_3A). Sulfatai yra svarbūs komponentai cementiniuose kompozituose, nes jie reguliuoja aluminatinių fazių, ypač trikalcio aluminato (C_3A), hidrataciją. Cheung'as ir kt. [40] savo straipsnyje aprašo kaip svarbu atitinkamai parinkti ir subalansuoti sulfato, tokio kaip gipsas ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), kiekį kompozite, ypač kai kompozite naudojamos organinės kilmės medžiagos, kurios turi gliukozės. Gliukozė, kaip organinis priedas sąveikauja su aluminatais (C_3A). Tačiau, jei sulfatai gerai kontroliuoja C_3A hidrataciją, tuomet gliukozės reakcija su juo yra mažesnė. Dėl to likusi gliukozė daro įtaką silikatinėms fazėms (C_3S), nuo kurių tiesiogiai priklauso kompozito stiprumas. Todėl tinkamas sulfato kiekis yra būtinas norint išlaikyti subalansuotą reakcijų eigą ir užtikrinti geras kompozito mechanines savybes. Doudart de la Grée'us ir kt. [41] tyrė kaip FG kiekis veikia Portlando cemento hidratacijos eigą, mikrostruktūrą ir mechanines savybes, kai sistemoje yra gliukozės. Tyrime naudojami du cemento tipai, G tipas turi daugiau C_4AF , o W tipas daugiau C_3S . Į cementą įmaišoma (0,2 % ir 0,3 % cemento masės) gliukozės, FG buvo keičiamas nuo 0 % iki 7 % (cemento masės). Hidratacijos reakcijos buvo stebimos naudojant izoterminę kalorimetriją, XRD, FTIR, SEM, rezultatai įvertinami per skiedinių ir medienos – cemento kompozitų bandymus. Tyrimo eigoje nustatyta, kad optimalus FG kiekis mišinyje yra: cementui su daugiau C_4AF – 7 %, o cementui su daugiau C_3S – 4 %. Tyrimas įrodė, kad sulfatų dozavimas yra kritinis veiksnys valdant cemento hidrataciją su organiniais priedais, tokiais kaip medžio pjuvenos. Naudojant optimalų FG kiekį, galima sumažinti gliukozės hidrataciją slopinantį poveikį, užtikrinti gerą ankstyvąją stiprį ir suformuoti stabilus bei stiprius medžio dalelių ir cemento kompozitus.

Apibendrinant galima teigti, kad tinkamai patinktas FG kiekis gali užtikrinti tinkamą cemento hidratacijos procesą, ypač kai naudojami organinės kilmės priedai, tokie kaip medžio pjuvenos. Sulfatai reguliuoja trikalcio aluminato (C_3A) hidrataciją ir sumažina gliukozės sąveiką su šiomis fazėmis, taip apsaugodami svarbiausią stiprumą lemiančią fazę – C_3S . Atžveigiant į tyrimus, matoma, kad optimalus FG kiekis yra iki 7 %, konkretus FG kiekis priklauso nuo cemento tipo. Todėl tinkamai

parinktas FG kiekis yra esminis veiksnys, mažinantis hidratacijos slopinimą ir gerinantis kompozitų ankstyvąją stiprį bei bendras mechanines savybes.

1.5. Literatūros apžvalgos išvados

Betonas išlieka viena pagrindinių statybinių medžiagų, tačiau jo gamybos procesas yra susijęs su didelėmis anglies dioksido emisijomis bei dideliu natūralių išteklių naudojimu, todėl sparčiai auga poreikis kurti aplinkai draugiškesnes ir tvaresnes alternatyvas. Nauji įstatymai ir aplinkosaugos iniciatyvos skatina naudoti organinės kilmės medžiagas statybose, o medžio pramonės atliekos, tokios kaip pjuvenos, laikomos perspektyviomis žaliavomis cemento pagrindo kompozitams. Literatūroje aptikta, kad medžio dalelių ir cemento kompozitai pasižymi geromis šilumos izoliacinėmis savybėmis, o jų mechaninis atsparumas, nors ir mažesnis nei tradicinių statybinių medžiagų, gali būti pakankamas tam tikroms konstrukcijoms. Tačiau medžio pjuvenų didelis vandens įgeriamumas bei prastas sukibimas su cemento matrica riboja jų praktinį pritaikymą, todėl naudojamas cheminis apdirbimas, kuris pagerina kompozito mechanines ir eksploatacines savybes.

Remiantis literatūros analize, chemiškai apdirbant medžio pjuvenas, dažnai naudojamos mineralinės medžiagos, tokios kaip NH, GK, SS, natrio hipochlorito NaOCl tirpalai bei SD mikrodulkės su MK, kurios efektyviai šalina ligniną, hemiceliuliozę ir kitas nepageidaujamas organines medžiagas, pagerina medžio dalelių paviršiaus savybes bei užtikrina geresnę sąveiką su cemento matrica. Šių apdorojimų derinimas tarpusavyje skatina papildomų kalcio silikato hidratų (C-S-H) susidarymą, kurie didina kompozito mechaninį stiprumą ir mažina poringumą. Tačiau literatūroje trūksta sistemingų tyrimų, kurie vertintų skirtingų cheminių apdorojimo metodų derinių poveikį medžio pjuvenų suderinamumui su cemento matrica. Ypač neištirti kompleksiniai apdorojimo būdai, derinantys GK, SS, FG, SD mikrodulkes, MK ir NH, todėl planuojamas tyrimas, lyginantis šiuos apdorojimo būdus yra aktualus ir gali reikšmingai prisidėti prie naujų tvarių kompozitinių medžiagų kūrimo ir jų taikymo statybų sektoriuje.

2. Medžiagos ir metodai

Magistrinio baigiamojo darbo tyrimo metu yra kuriamas kompozitas, kuris gaminamas iš cemento ir specialiais mineraliniais priedais apdorotų pjuvenų, kurios naudojamos kaip dalinis cemento pakaitalas. Tyrime kuriami specialūs, mineraliniais priedais, apdorotų pjuvenų mišiniai, nustatomas tinkamas v/c kompozito santykis, tiriamos kompozitų fizikinės ir mechaninės savybės.

2.1. Tyrime naudotos medžiagos

Kaip rišiklis naudojamas cementas, kaip dalinis cemento pakaitalas naudojamos medžio pjuvenos, kurių modifikavimui naudojamos įvairios medžiagos kaip SS, GK, FG, SD, NH ir MK

Vanduo

Visoms tyrimo reikmėms naudotas geriamasis vanduo iš Kauno miesto vandentiekio.

Cementas

Tiriamąjį darbo metu buvo naudojamas Švedijos prekinio ženklo „ROCKET“ portlandcementis CEM I 42,5 R

CEM I 42,5 R portlandcementis atitinka LST EN 197-1:2011[42] standartą. Gaminamas iš portlando klinkerio ir kitų priedų. Dažniausiai naudojamas statybinėms konstrukcijoms, kurios reikalauja didelio stiprio per trumpesnį laiką. Cementas naudojamas kaip viena iš kompozito sudedamųjų dalių. Cemento mechaninės ir fizikinės savybės pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Cemento mechaninės ir fizikinės savybės

Cemento markė	Rišimosi pradžia, min	Tūrio pastovumas, mm	Gniuždymo stipris, MPa	
			Po 2 d.	Po 28 d.
CEM I 42,5 R	60	10	20	42,5-62,5

Cemento cheminė sudėtis pateikta 2 lentelėje.

2 lentelė. Cemento cheminė sudėtis

Cemento markė	SO ₃ , %	Chloridai, %	Na ₂ Oekv., %
CEM I 42,5 R	4,0	0,10	0,8

Pjuvenos

Tiriamąjį darbo metu naudotos pjuvenos išgaunamos iš prekyboje paplitusių medienos granuliu, kurių pagrindinė paskirtis – kuras deginimo sistemose. Granulės apdirbimo metu panardinamos į tirpalus. Procesu metu granulė netenka savo formos ir išsiskaido į pjuvenas. Deklaruojamas pelenų kiekis $\leq 0,7\%$. Naudotų pjuvenų charakteristikos pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Medžio pjuvenų charakteristikos

Medžiaga	Dalelių ilgis, mm	Dalelių plotis, mm
----------	-------------------	--------------------

Medžio pjuvenos	1-4	0,5-1,5
-----------------	-----	---------

Natrio silikatas Na_2SiO_3

Tiriamąjį metu buvo naudojamas 37,3 % koncentracijos Na_2SiO_3 tirpalas. Skystas stiklas (SS) statybų pramonėje naudojamas kaip priedas, kurio pagalba mažinamas betono poringumas, taip mažinant betono vandens įgeriamumą. SS tirpalas naudotas medžio pjuvenų mišiniams paruošti. Naudoto SS tirpalo savybės pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. SS tirpalo savybės

Medžiaga	Na_2O , %	SiO_2 , %	Piltnis tankis, g/cm^3
Na_2SiO_3	9,3	28,0	1,38

Kalcio hidroksidas $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Kalcio hidroksidas arba gesintos kalkės (GK) – neorganinis junginys, kuris statybos pramonėje dažniausiai naudojamas mišinių kietėjimo ar džiūvimo skatinimui ar gruntų stabilizavimui. GK naudotos medžio pjuvenų mišiniams paruošti. Naudoto GK tirpalo sudėtis ir savybės pateiktos 5 lentelėje.

5 lentelė. GK tirpalo sudėtis ir savybės

Medžiaga	CaO , %	MgO , %	CO_2 , %	Piltnis tankis, g/cm^3
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	95,68	0,71	1,58	2,21

Fosfogipsas CaSO_4

Tiriamąjį darbo metu buvo naudojamas fosfogipsas (FG) išgautas iš Kėdainiuose esančios fosfatinių trąšų gamyklos. FG statybos pramonėje nėra plačiai paplitęs, tačiau pastebimas vis didėjantis susidomėjimas šios medžiagos antriniu panaudojimu. FG sudėtyje yra radioaktyvių medžiagų [43] ir gali kelti pavojų žmogaus organizmui [44]. Dėl šių priežasčių FG naudojimas yra ribojamas. FG gali būti naudojamas kelių tiesimui, cemento ir kitų medžiagų gamyboje. Gong'as ir kt. [45] nustatė, kad nedidelis FG kiekis kompozite gali pagerinti cementinių medžiagų savybes.

Silicio dioksidas SiO_2

Baigiamąjį darbo metu buvo naudojamas silicio dioksidas (SD) mikrodulkės. Medžiagos koncentracija 98,1 %. SD mikrodulkės statyboje naudojamos, kaip priedas, kuris pagerina betono savybes, tokias kaip stiprumą, ilgaamžiškumą ir atsparumą vandeniui. SD mikrodulkės naudojamos kaip dalinis cemento pakaitalas ruošiant kompozito bandinius. SD sudėtis ir savybės pateiktos 6 lentelėje.

6 lentelė. SD mikrodulkių sudėtis ir savybės

Medžiaga	SiO_2 , %	Piltnis tankis, g/cm^3
SiO_2	98,1	0,50

Natrio hidroksidas NaOH

Baigiamojo darbo metu buvo naudojamas natrio hidroksidas (NH). Medžiagos koncentracija 99,6 %. NH statyboje naudojamas cemento mišinio plastifikatoriuose, kuris padeda homogenizuoti cemento mišinius, sumažinti reikalingą vandens kiekį ir padidinti cemento apdirbamumą. NH naudotas medžio pjuvenų mišiniams paruošti. NH sudėtis ir savybės pateiktos 7 lentelėje.

7 lentelė. NH sudėtis ir savybės

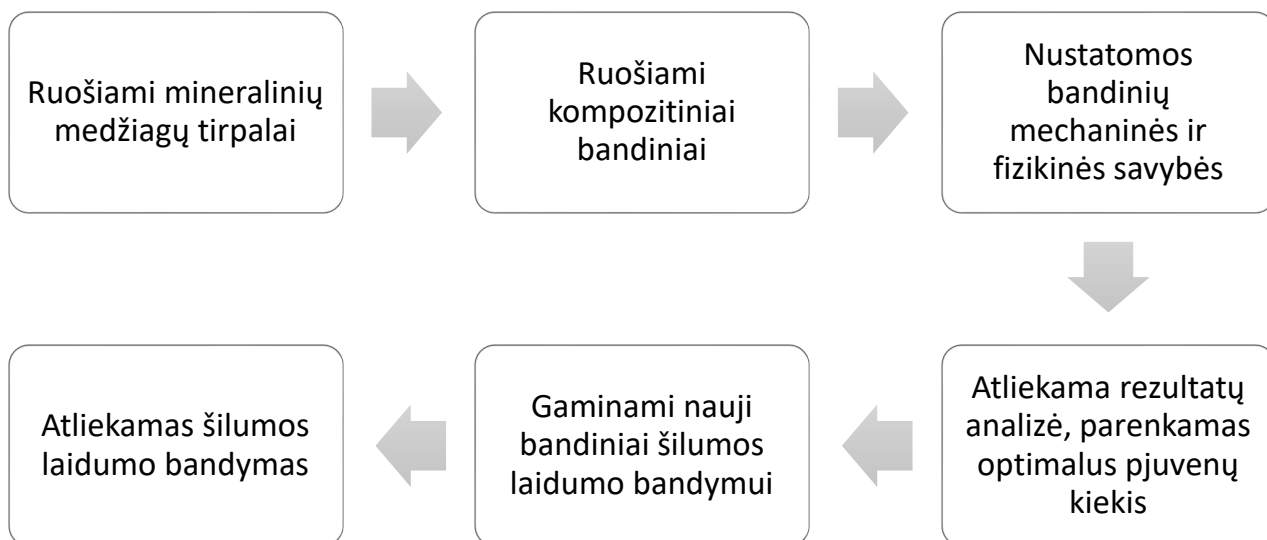
Medžiaga	NaOH, %	Na ₂ CO ₃ , %	Piltnis tankis, g/cm ³
NaOH	99,6	0,41	2,13

Metakaolinas Al₂Si₂O₇

Baigiamojo darbo metu buvo naudojamas natrio metakaolinas (MK). MK statyboje naudojamos kaip pucolanas, betono mišinyje pagerina cemento hidrataciją ir dalyvauja pucolaninėje reakcijoje su portlanditu. MK naudojama kaip dalinis cemento pakaitalas ruošiant kompozito bandinius.

2.2. Tyrimo eiga

Tyrimu buvo siekiama nustatyti optimalų medžio pjuvenų kiekį kompozite ir palyginti skirtingų medžio pjuvenų apdirbimo įtaką kompozito savybėmis. Tyrimas padalintas į kelis etapus. Pirmiausia paruošiami skirtingų mineralinių medžiagų tirpalai medžio pjuvenų mirkymui. Sekančiu etapu ruošiami kompozito bandiniai su skirtingų apdorotų pjuvenų kiekiu. Nustatomos mechaninės ir fizikinės savybės. Atlikus rezultatų analizę, kiekvienam apdirbimo tipui parenkamas optimalus pjuvenų kiekis kompozite ir gaminami nauji bandiniai medžiagos šilumos laidumo tyrimui. Tyrimo eiga grafiškai pavaizduota 2 pav.



2 pav. Tyrimo eiga

Mechaninių ir fizikinių savybių nustatymui formuojami 6 skirtingi bandinių tipai, kurių sudėtis aprašyta 8 lentelėje.

8 lentelė. Bandinių sudėtis 1m³ kompozito

Bandinio pjuvenų mišinio kiekis.	Cementas, kg	Apdorotos pjuvenos*, kg	V/C santykis **	SD, kg	MK, kg	FG, kg
Kontrolinis						
-	1563	-	0,50	-	-	-
Neapdorota						
5%	1484	17,45	0,33	-	-	-
20%	1250	69,80	0,40	-	-	-
35%	1015	122,15	0,53	-	-	-
50%	781	174,50	0,85	-	-	-
Vandenyje						
5%	1484	17,45	0,35			
20%	1250	69,80	0,37			
35%	1015	117,71	0,55			
50%	781	174,50	0,78			
SS+GK						
5%	1484	16,83	0,38	-	-	-
20%	1250	67,34	0,50	-	-	-
35%	1016	117,9	0,62	-	-	-
50%	781	168,35	0,87	-	-	-
NH+GK+SD+MK						
5%	1225	21,10	0,47	148,40	111,30	-
20%	1031	84,39	0,48	125,00	93,80	-
35%	837,1	147,68	0,60	101,60	76,20	-
50%	645	210,97	0,88	78,10	58,60	-
SS+FG						
5%	1473	18,07	0,37	-	-	46,90
20%	1175	72,27	0,43	-	-	60,90
35%	954	126,46	0,59	-	-	75,00
50%	781	180,66	0,83	-	-	89,10

8 lentelės trumpinių paaiškinimas:

- Kontrolinis – kontrolinis bandinys be pjuvenų;
- Neapdorotos – pjuvenos neapdorotos.
- Vandenyje – pjuvenos mirkomos vandenyje;
- SS+GK – pjuvenos mirkytos 6 % SS ir 5 % GK tirpale;
- NH+GK+SD+MK – pjuvenos mirkomos 5 % NH ir 5 % GK tirpale ir 10 % SD ir 7,5 % MK pridedama į kompozito mišinį;
- SS+FG – pjuvenos mirkytos 6 % SS tirpale ir 5 % FG pridedama į kompozito mišinį;

Pastabos:

* pateikta sausų pjuvenų masės reikšmė po pjuvenų apdirbimo mišinių džiovinimo.

** įvertintas papildomas vandens kiekis esantis pjuvenų apdirbimo mišiniuose.

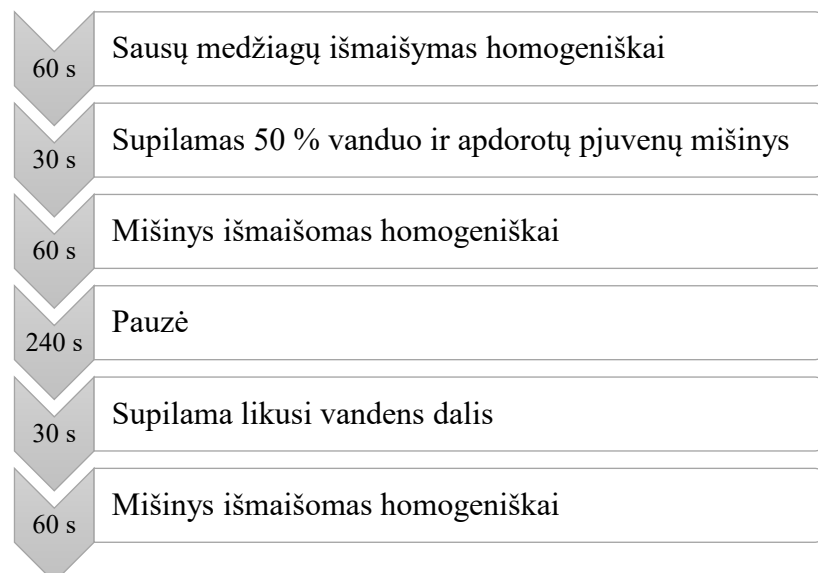
Pjuvenų cheminio apdirbimo mišiniai po 24 valandų pateikti 3 pav.



3 pav. Pjuvenų apdirbimo mišinys SS+GK (a), NH+GK (b), SS (c).

2.3. Bandinių formavimas

Kompozitiniai bandiniai formuojami 40x40x160 mm prizmelėse. Cemento kiekis buvo keičiamas apdorotų pjuvenų mišinio kiekiu ir tam tikruose bandiniuose SD, FG ir MK kiekiu. V/c santykis kiekvienam bandiniui nustatomas pagal standartą LST EN 196-3 [46] atliekant standartinį cemento tešlos konsistencijos bandymą. Bandinių mišinio ruošimo seka pateikta 4 pav.



4 pav. Bandinių mišinio ruošimo seka

2.4. Tyrimo metodai

Tyrimas susideda iš kelių etapų. Pirmas iš jų medžio pjuvenų paruošimas, po to normalios tešlos konsistencijos nustatymo bandymas, bandinių formavimas po to atliekami gniuždymo, lenkimo ir vandens įmirkimo ir šilumos laidumo bandymai.

2.4.1. Medžio pjuvenų paruošimas

Kiekvienas medžio pjuvenų apdorojimas vyko atskirai mirkant tam tikrą kiekį pjuvenų specialiai paruoštame tirpale. Paruošiami trys skirtingi mineralinių medžiagų tirpalai, kurių sudėtis nurodyta 9 lentelėje.

9 lentelė. Tirpalų sudėtis

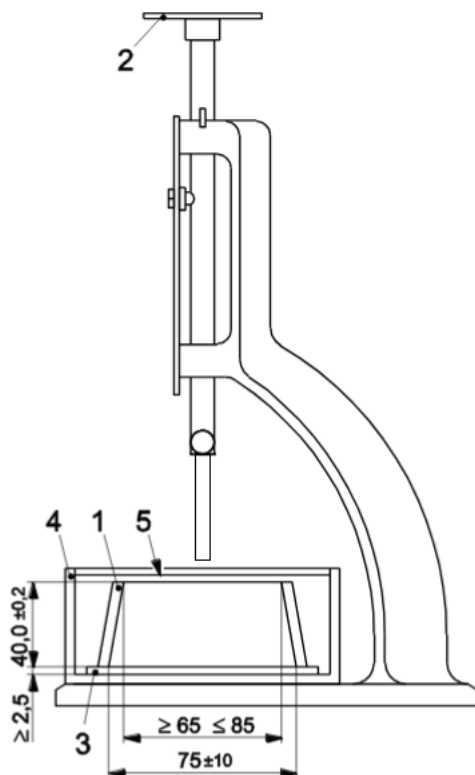
Medžiaga	Kiekis, %	Kiekis, g
Tirpalas SS+GK		
SS	6	750
GK	5	625
H ₂ O	89	1112,5
Tirpalas NH+GK		
NH	5	625
GK	5	625
H ₂ O	90	11250
Tirpalas SS		
SS	6	750
H ₂ O	90	11750

*Lentelėje pateikti kiekiai jau įvertinus medžiagų koncentraciją.

Pjuvenos mirkamos 24 valandas aukščiau pateiktuose tirpaluose. Tirpalo/pjuvenų santykis 25 g/g. Papildomai mirkoma ir paprastame vandenyje. Iš viso mirkymas atliekamas keturiems pjuvenų apdirbimo tipams. Po 24 valandų mirkymas sustabdomas, pjuvenos išimamos ir paliekamos kambario temperatūroje.

2.4.2. Normalios konsistencijos bandymas

Kiekvienam pjuvenų apdirbimui nustatomas atliekamas normalios tešlos konsistencijos bandymas pagal standartą LST EN 196-3 [46]. Bandymas atliekamas su Viko prietaisu. Bandymas kartojamas, kol nustatomas tokia tešla, kurioje tarp strypelio ir pagrindo plokštės užtikrinamas (6 ± 2) mm atstumas. Vandens kiekis šioje tešloje priimamas kaip normalios konsistencijos tešloje. Viko prietaiso schema pavaizduota 5 pav. Normalios tešlos konsistencijos nustatymo bandymas pavaizduotas 6 pav.



5 pav. Viko prietaisas [46]



6 pav. Normalios tešlos konsistencijos nustatymo bandymas

2.4.3. Tankio, gniuždymo ir lenkimo stiprio nustatymas

Tankio, gniuždymo ir lenkimo stiprio nustatymo bandiniai buvo atliekami po 7, 14 ir 28 parų pagal standartus LST EN 12390-7 [47], LST EN 12390-4 [48] ir LST EN 12390-5 [49]. Tankio ir lenkimo stiprio nustatymui buvo naudojamos $40 \times 40 \times 160$ mm matmenų prizmės. Lenkimo stipris vertintas atliekant bandymą su centrine taško apkrova. Po lenkimo bandymo kiekviena prizmė buvo padalinta į dvi dalis, kurių kiekviena vėliau buvo gniuždoma 40×40 mm paviršiaus srityje naudojant hidraulinį presą. Lenkimo bandymas pavaizduota 7 pav. Gniuždymo bandymas pavaizduotas 8 pav.



7 pav. Lenkimo bandymas



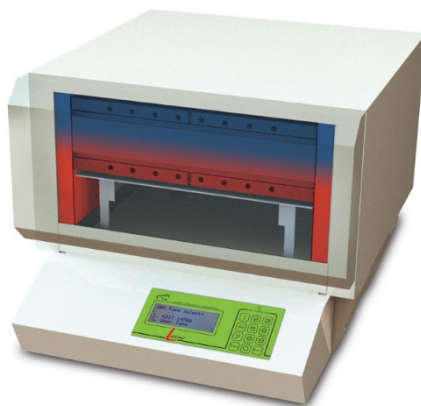
8 pav. Gniuždymo bandymas

2.4.4. Vandens įmirkimo nustatymas

Bandinių vandens įgeriamumas nustatomas po 28 parų nuo bandinio suformavimo pagal standartą LST EN 772-21:2011 [50]. Bandiniai mirkomi kambario temperatūros vandenyje 48 valandas.

2.4.5. Šilumos laidumas nustatymas

Šilumos laidumui nustatyti buvo naudojami 300x300x50 mm matmenų bandiniai. Bandiniai iki bandymo kietėjo 28 dienas. Bandiniai prieš matavimus džiovinami 60 °C temperatūroje iki pastovios masės. Šilumos laidumo bandymas atliekamas pagal standartą LST EN 12667 [51]. Šilumos laidumo bandymas atliekamas su šilumos srauto matuokliu FOX 314, kuris pateiktas 9 paveiksle. Šilumos laidumo bandymas atliktas „Kauno šilas“ termoizoliacinių medžiagų laboratorijoje.



9 pav. Šilumos srauto matuoklis [52]

2.5. CO₂ pėdsako skaiėiavimai

Tiriamajo darbo tyrimo metu apskaiėiuojamas ir palyginamas kompozito be pjuvenų ir kompozito su medžio pjuvenomis CO₂ emisijų kiekis.

Skaiėiavimo principas

Siekiant supaprastinti skaiėiavimo procesą, vertinama tik gamybos metu išsiskyrusį CO₂ emisijų kiekį atsižvelgiant tik į cemento, vandens ir medžio pjuvenų naudojimo kiekį. Šiame skaiėiavime taip pat nevertinama transportavimo ir mechaninių apdirbimo prietaisų išskiriamas CO₂ kiekis. Skaiėiavimas atliktas pagal formulę 1.

$$C = \sum_{i=1}^n m_i \cdot k_i \quad (1)$$

čia C – bendras CO₂ emisijų kiekis, kgCO₂e;

m_i – i-tosios medžiagos masė, t;

k_i – i-tosios medžiagos CO₂ emisijų koeficientas, kgCO₂e/t

CO₂ emisijų koeficientas

Cemento ir medžio pjuvenų CO₂ emisijų koeficientai parinkti iš produkto poveikio aplinkai deklaracijų (EPD) A1-A3 stadijų, kurios vertina procesus nuo neapdirbtos žaliavos gavybos iki pagaminto produkto išsiuntimo iš gamyklos. Vandens CO₂ emisijų koeficientas priimtas pagal Xu ir kt. [53] tyrime pateiktą reikšmę.

Medžiagų CO₂ emisijų koeficientai ir medžiagų kiekis skirtas 1m³ kompozito gamybai ir bendri CO₂ emisijų kiekiai pateiktas 10 lentelėje.

10 lentelė. Bandinių mišinio ruošimo seka

Medžiaga	CO ₂ emisijų koeficientas (kgCO ₂ e/t)	Medžiagų masė skirta 1 m ³ kompozitui pagaminti, t				
		Kontrolinis	5 %	20 %	35 %	50 %
Cementas	676,0 [54]	1,56	1,43	1,19	0,97	0,75
Vanduo	0,17 [53]	0,78	0,54	0,52	0,56	0,63
Medžio pjuvenos	2610,00[55]	0	0,02	0,07	0,13	0,18
Bendras CO ₂ emisijų kiekis, kgCO ₂ e		1056,4	966,9	805,2	653,9	509,3

2.6. Tyrimo patikimumas ir validacija

Laboratorinio tyrimo patikimumas ir validacija užtikrinama naudojant sertifikuotą matavimo ir bandymo įrangą, atliekant pakartotinius matavimus ir išbandant bent 3 tokios paėios sudėties

bandinius. Tankio, gniuždymo, lenkimo, vandens įmirkio bei šilumos laidumo bandymai atliekami pagal LST EN standartus.

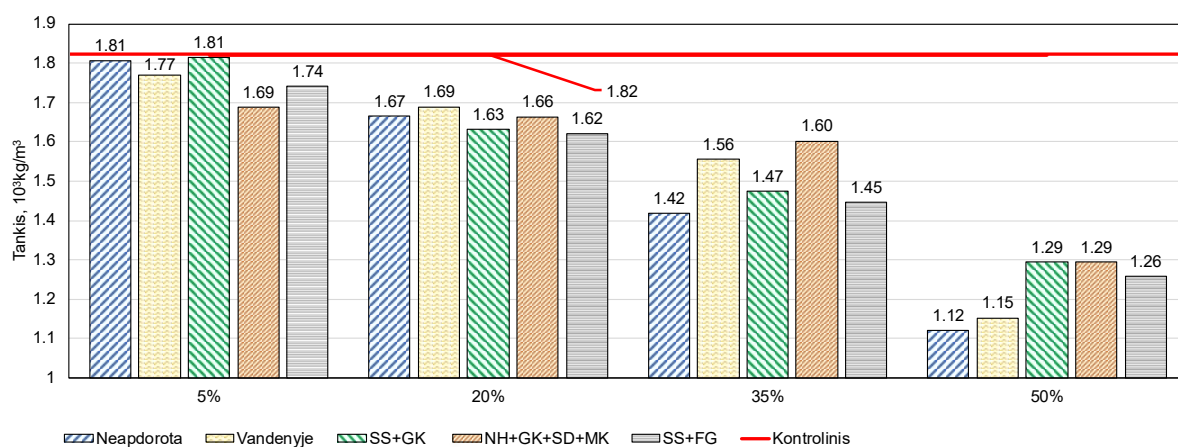
3. Rezultatai ir diskusija

Šiame skyriuje pateikiami kompozitų parametrų priklausomybė nuo bandinio pjuvenų kiekio bei apdorojimo būdo apibendrinti bandymų ir skaičiavimų rezultatai. Tiriamajame darbe apžvelgiami tankio, gniuždymo stiprio, lenkimo stiprio, įmirkio ir šilumos laidumo parametrai.

3.1. Kompozitų tankis

Bandinių tankio priklausomybė nuo pjuvenų kiekio bei apdorojimo būdo pateikta 10 paveiksle. Bandinių tankis nustatomas po 28 parų nuo bandinių suformavimo. Fiksuojama nedžiovintų bandinių masė.

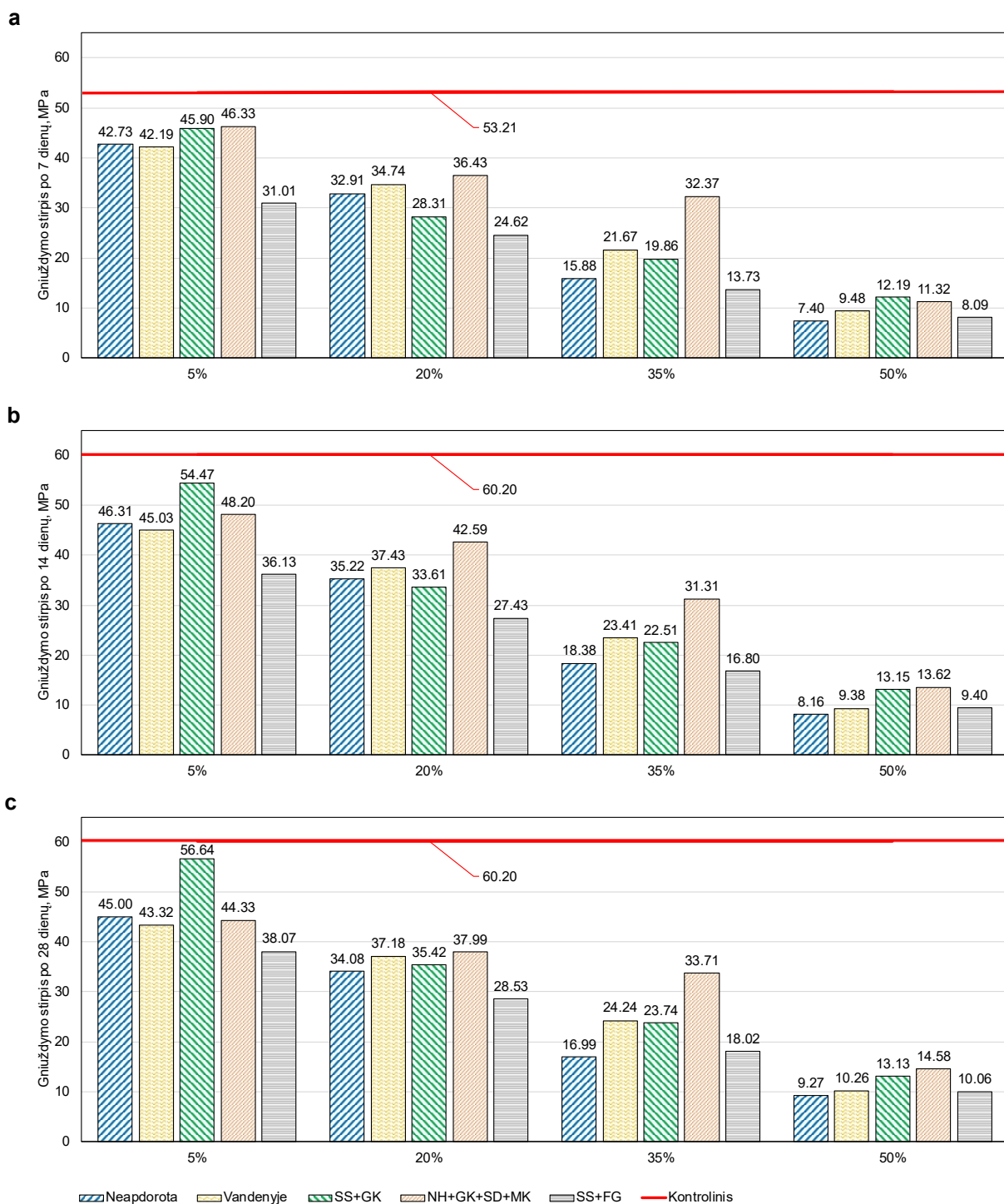
Bandymo metu pastebėta, kad didinant pjuvenų kiekį mažėja kompozito tankis. Kai pridėtinių pjuvenų kiekis mažas (5 %), geriausius rezultatus rodo bandiniai su SS+GK ir neapdorotomis pjuvenomis, t. y. 1 % ir 1,4 % atitinkamai pasiektas mažesnis tankis lyginant su kontroliniu bandiniu be pjuvenų. Vandenyje ir SS+FG apdorojimo būdai taip pat išlaiko didesnę tankį, t. y. 2,7 % ir 4,4 % mažiau už kontrolinį bandinį. Mažiausias tankis užfiksuotas NH+GK+SD+MK bandiniuose – 7,1 % mažiau už kontrolinį bandinį. Tačiau atsižvelgiant į bandinius su didesniu pjuvenų kiekiu (20-35 %), matoma, kad didžiausias tankis pasiektas su bandiniais, kurių apdirbimas buvo mirkymas vandenyje ir NK+GK+SD+MK. Prie 20 % pjuvenų koncentracijos didžiausias tankį pasiekė vandenyje apdorotos pjuvenos (1690 kg/m^3), po jo seka neapdorotos ir NH+GK+SD+MK su 1670 kg/m^3 ir 1660 kg/m^3 tankiais. Mažiausią tankį pasiekė SS+GK ir SS+FG, t. y. 1630 kg/m^3 ir 1620 kg/m^3 . Prie 35 % pjuvenų koncentracijos dar labiau išryškėja vandenyje ir NH+GK+SD+MK apdorojimo būdo pranašumai, pasiektas 1560 kg/m^3 ir 1600 kg/m^3 tankis atitinkamai. Neapdorotų, SS+GK ir SS+FG tankis svyruoja nuo 1420 kg/m^3 iki 1470 kg/m^3 . Bandinių su didžiausiu pjuvenų kiekiu (50 %) pastebima, žymus skirtumas tarp chemiškai neapdorotų ir apdorotų pjuvenų. Neapdorotos ir vandenyje mirkytos pjuvenos pasiekia žymiai mažesnę tankį ($1120\text{--}1150 \text{ kg/m}^3$), o chemiškai apdoroti bandiniai pasiekė apie 1300 kg/m^3 tankį. Didžiausią tankį pasiekė NH+GK+SD+MK (1295 kg/m^3) Pjuvenų apdorojimo metu, panaudotos mineralinės medžiagos pagerina sąveiką tarp medžio pjuvenų ir cementinės matricos, taip ilgiau išlaikant didesnę kompozitinės medžiagos tankį, tačiau esant dideliame pjuvenų kiekiui (50 %) tankio reikšmės drastiškai krinta.



10 pav. Tankių rezultatai

3.2. Kompozitų gniuždomasis stipris

Kompozitų gniuždymo stiprio priklausomybė nuo pjuvenų kiekio bei apdorojimo būdo pateikta 11 paveiksle (a) po 7 dienų, (b) po 14 dienų, (c) po 28 dienų. Bandymo metu pastebėta, kad didinant pjuvenų kiekį ženkliai mažėja kompozito gniuždymo stipris. Kai pridėtinių pjuvenų kiekis mažas (5 %), geriausius rezultatus rodo bandiniai su SS+GK, t. y. 9,5 % pasiektas mažesnis gniuždymo stipris lyginant su kontroliniu bandiniu be pjuvenų. Bandiniai paruošti su neapdorotomis, vandenyje ir NH+GK+SD+MK apdorotomis pjuvenomis pasiekė panašias gniuždymo stiprio reikšmes (44,33–45,00 MPa), t. y. apie 27 % mažesnės reikšmės lyginant su kontroliniu. Mažiausias stipris gautas su SS+FG (38,07 MPa), t. y. 36,8 % mažiau už kontrolinį. Tačiau atsižvelgiant į bandinius su didesne pjuvenų koncentracija matoma tendencija, kad bandiniai su NK+GK+SD+MK išlaiko didžiausią gniuždymo stiprį tarp visų apdirbimo būdų. Prie 20 % pjuvenų koncentracijos NK+GK+SD+MK ir vandenyje rezultatai gana panašūs (37,99 MPa ir 37,18 MPa), t. y. skirtumas apie 2 %. Tą patį galima pasakyti ir apie SS+GK ir neapdorota bandinius (35,42 MPa ir 34,08 MPa), t. y. skirtumas apie 3,7 %. SS+FG bandinių stipris mažiausias – 28,53 MPa. Apžvelgiant 35 % pjuvenų koncentracijos grafikus pastebimas aiškus NK+GK+SD+MK gniuždymo stiprio vertės išsiskyrimas nuo kitų apdirbimo būdų, pasiektas 33,71 MPa, kas yra 28 % daugiau už vandenyje (24,24 MPa) ir 30 % už SS+GK (23,74 MPa). SS+FG ir neapdorota bandiniai pasiekė 18,02 MPa ir 16,99 MPa atitinkamai. Prie 50 % pjuvenų koncentracijos pastebimas staigus stiprio kritimas ties visais apdirbimo būdais. NK+GK+SD+MK ir SS+GK pasiekė didžiausias reikšmes (14,58 MPa ir 13,13 MPa). Likusių bandinių gniuždomasis stipris apie 10 MPa. Matoma aiški bandinių gniuždymo stiprio ir tankio koreliacija. Didesnis tankis prilygsta didesniam gniuždymo stipriui o tankis tiesiogiai priklauso nuo sudedamųjų kompozito dalių savybių. Chemiškai modifikuojant medžio pjuvenas, gerinamos gniuždymo stiprio ir taip pat tankio savybės.

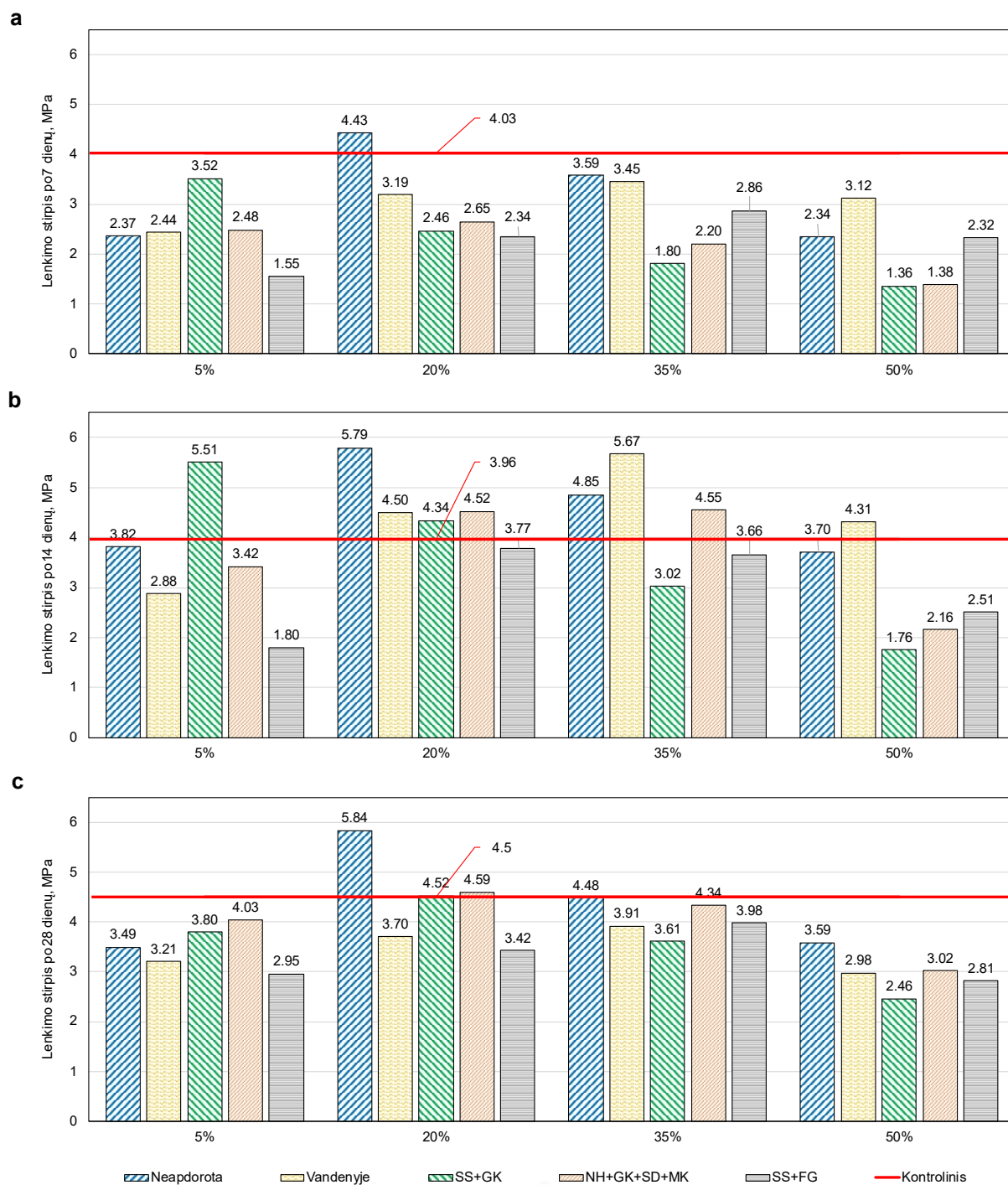


11 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai po 7 dienų (a), po 14 dienų (b), po 28 dienų (c)

3.3. Kompozitų lenkiamasis stipris

Kompozitų lenkimo stiprio priklausomybė nuo pjūvenų kiekio bei apdorojimo būdo pateikta 12 paveiksle (a) po 7 dienų, (b) po 14 dienų, (c) po 28 dienų. Bandymo metu pastebėta, kad lenkimo stipris padidinus pjūvenų kiekį kompozite didina ir lenkimo stiprį. Kontrolinio bandinio pasiektas lenkimo stipris po 14 dienų 3,96 MPa. Beveik visi bandiniai su 20 % pjūvenų pasiekė ar net pranoko

kontrolinio bandinio rezultatus. Kai pjuvenų kiekis 5 % didžiausias lenkimo stipris pasiektas su NH+GK+SD+MK (4.03 MPa), 10 % mažiau už kontrolinį. SS+GK bandiniai pasiekė 3,8 MPa stiprį, t. y. apie 15,6 % mažiau už kontrolinį. Neapdorotų ir vandenyje bandiniai pasiekė 3,49 MPa ir 3,21 MPa stiprį, 22,4 % ir 28,6 % mažiau už kontrolinį. SS+FG – parodė prasčiausius rezultatus (2,95 MPa), net 34,4 % mažiau už kontrolinį. Didinant pjuvenų kiekį iki 20 % matomas staigus stiprio šuolis. Didžiausią lenkimo stiprį pasiekė bandinys su neapdorotomis pjuvenomis (5,79 MPa), t. y. net 29,7 % geresnė reikšmė už kontrolinio. NH+GK+SD+MK ir SS+GK taip pat pasiekė gerus rezultatus (4,59 MPa ir 4,52 MPa), t. y. šiek tiek geriau nei kontrolinis. Vandenyje ir SS+FG nepasiekė 4 MPa ribos. Bandiniuose su 35 % pjuvenų koncentracija geriausias reikmės gautos mirkymas vandenyje 4,48 MPa ir NH+GK+SD+MK 4,34 MPa. SS+FG ir vandenyje gavo panašias reikšmes (3,98 MPa ir 3,91 MPa), bei SS+GK gavo prasčiausius rezultatus su 3,61 MPa lenkiamuoju stipriu. Didinant pjuvenų kiekį iki 50 % tendencijos išlieka panašios – neapdorota pasiekia geriausią reikšmę (3,59 MPa) ir visi kiti apdorojimo būdai išsidėsto atitinkamai: NH+GK+SD+MK (3,02 MPa), vandenyje (2,98 MPa), SS+FG (2,81 MPa) ir SS+GK (2,49 MPa). Lenkiamojo stiprio padidėjimas buvo tikėtinas rezultatas, dėl medžio pjuvenų savybės, kuri, dėl medžio pjuvenų dalelių formos, natūraliai armuoja kompozitą taip padidinant atsparumą tempimui, kas tiesiogiai veikia ir lenkimo stiprį. Mineraliniais priedais apdorotų pjuvenų bandiniai didelės teigiamos įtakos lenkimo stipriui neturėjo. Matoma, kad cheminis apdorojimas mažina lenkiamąjį stiprį lyginant su neapdorotomis ir vandenyje apdorotomis pjuvenomis.

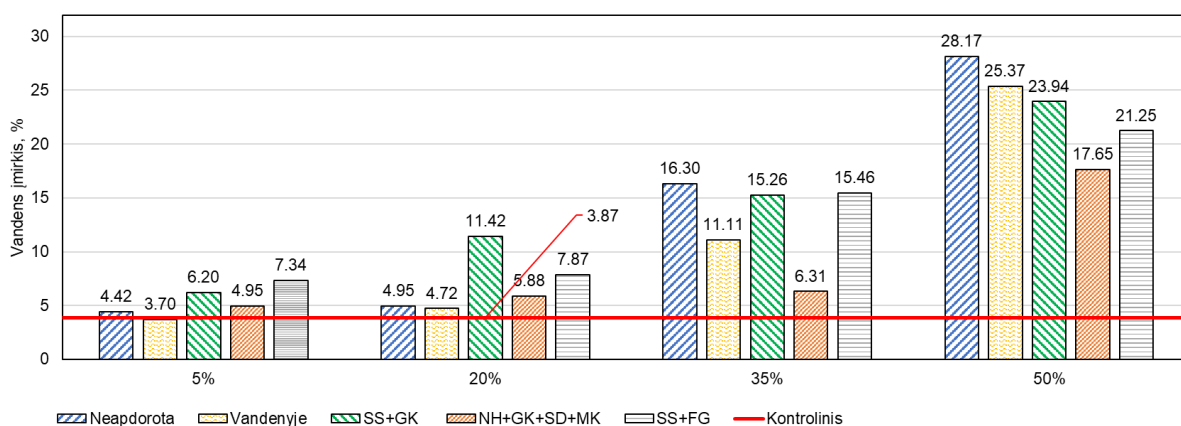


12 pav. Lenkimo stiprio rezultatai po 7 dienų (a), po 14 dienų (b), po 28 dienų (c)

3.4. Vandens įmirkis

Kompozitų vandens įmirkio priklausomybė nuo pjuvenų kiekio bei apdorojimo būdo pateikta 13 paveiksle. Atlikus bandymą galima matyti, kad bandinio tankis tiesiogiai priklauso nuo medžio pjuvenų kiekio kompozite. Matoma, kad didinant pjuvenų kiekį, atitinkamai didėja ir vandens įmirkis. Vandens įmirkis 5 % ir 20 % bandiniuose neturėjo didelio pokyčio nuo kontrolinio bandinio rezultato. Bandiniuose su 5% pjuvenų koncentracija geriausi rezultatai pasiekti su vandenyje ir neapdorota kombinacijomis, 3,70 % ir 4,42 % atitinkamai, tai atitinka kontrolinio bandinio reikšmės. Tikėtina, kad vandenyje apdoratų pjuvenų vandens įmirkis mažas dėl, pjuvenų ruošimo proceso, t. y. pjuvenos

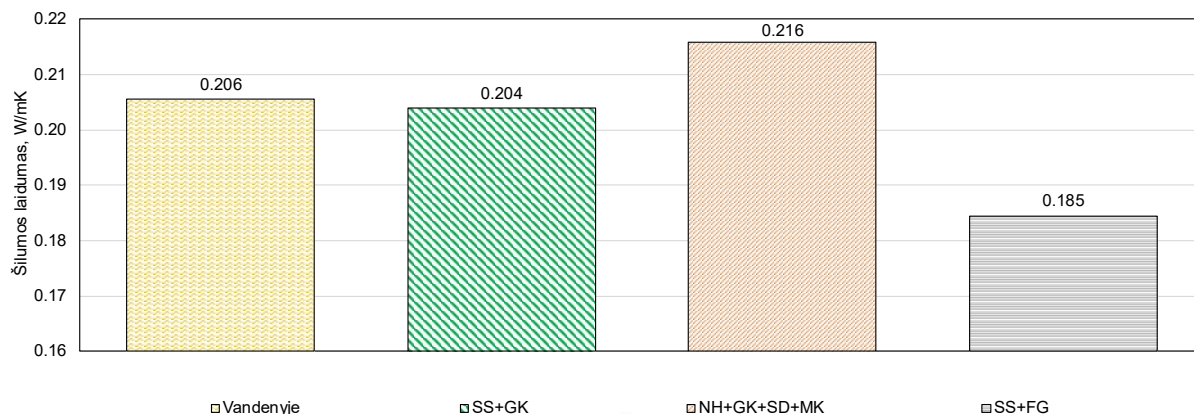
mirkomos 24 valandas vandenyje. NH+GK+SD+MK su 4,95 %, SS+GK su 6,20 % ir SS+FG su 7,34 % vandens įmirkiu. 20 % bandiniuose rezultatai panašūs kaip ir 5 % bandiniuose. Neapdorotų ir vandenyje vandens įmirkis 4,95 % ir 4,72 % atitinkamai. NH+GK+SD+MK ir SS+FG 5,88 % ir 7,87 % vandens įmirkis. NH+GK+SD+MK su 4,95 %, SS+GK su 6,20 %. SS+GK įmirkis padidėjo iki 11,42 % vandens įmirkis. NH+GK+SD+MK su 4,95 %, SS+GK su 6,20 %. 35 % bandiniuose labiau išryškėja cheminio medžio pjuvenų apdirbimo nauda, geriausias rezultatas pasiektas su NH+GK+SD+MK bandiniais, vandens įmirkis siekia 6,31 %. Toliau seka apdorojimas vandenyje su 11,11 % ir visi likę apdorojimo būdai, kurių įmirkis apie 16 %. 50 % bandiniuose, nors ir įmirkis ganėtinai didelis, geriausiai pasirodė NH+GK+SD+MK su 17,65 %. Kitų bandinių įmirkis virš 20 %. Toks rezultatas pasiektas dėl SD ir MK savybių mažinti kompozito poringumą. 35 % ir 50% bandiniuose didžiausią vandens įgeriamumą pasiekė bandiniai su neapdorotomis pjuvenomis, net 16,30 % ir 28,17 %. Tai rodo, kad nechemiškai apdorotos pjuvenos negali prilygti mineralinėmis medžiagomis apdorotiems bandiniams.



13 pav. Vandens įmirkimo bandymo rezultatai

3.5. Šilumos laidumas

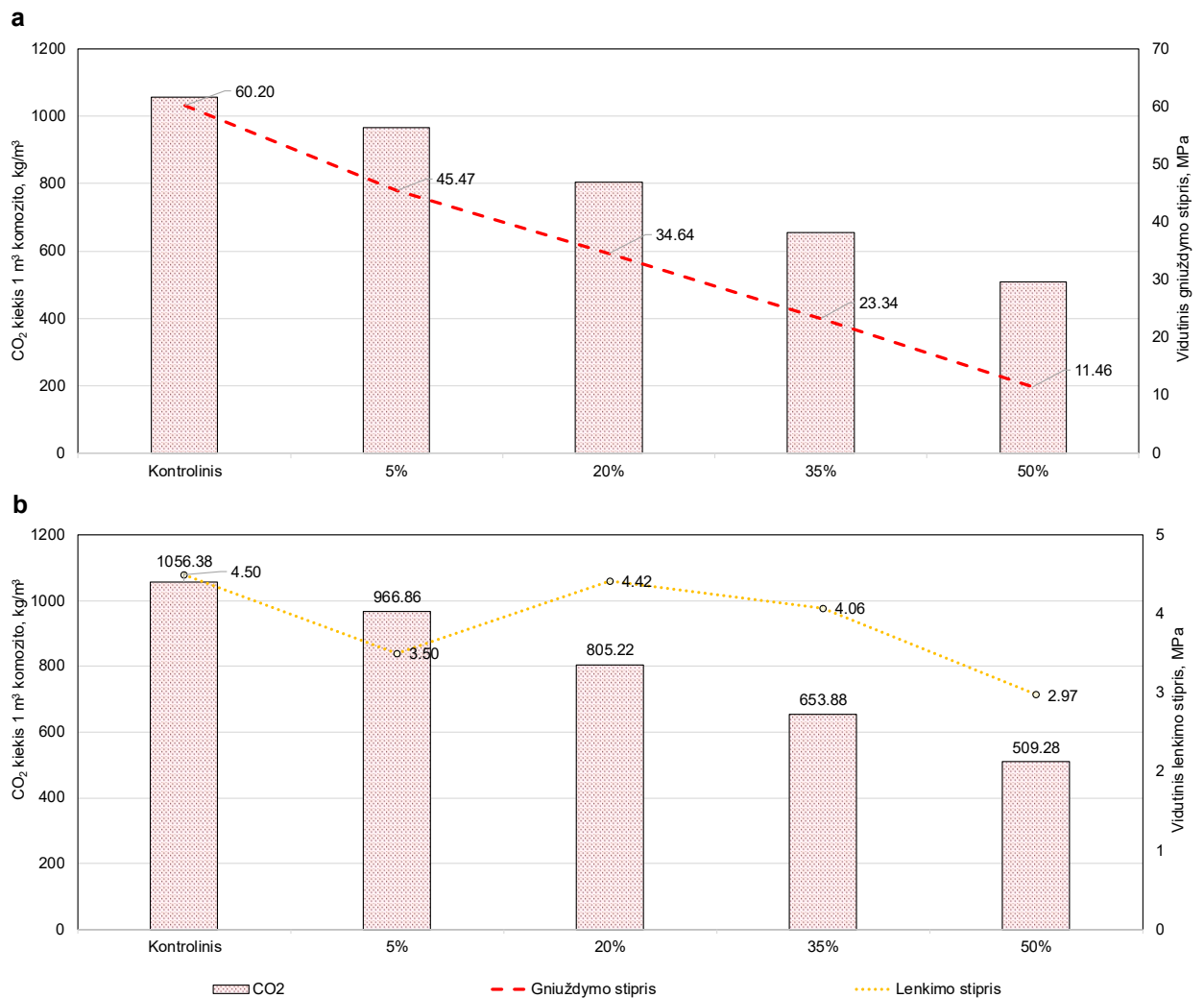
Kompozitų šilumos laidumo priklausomybė nuo apdorojimo būdo pateikta 14 paveiksle. Visi bandiniai su medžio pjuvenomis pasiekė gerus rezultatus 0,185-0,216 W/mK. Lyginant su kontroliniu bandiniu, kurio šilumos laidumo koeficientas priimamas 1,0 W/mK, gaunama iki 82 % geresnės šilumos laidumo reikšmės. Geriausią rezultatą pasiekė bandinys su SS+FG – 0,185 W/mK. NH+GK+SD+MK šilumos laidumo rodiklis didžiausias, tai galima paaiškinti bandinio didesniu tankiu bei SD mikrodulkių savybę užpildyti kompozito poras, taip mažinant poringumą ir didinant šilumos laidumą. Nors ir SS+FG pasiektas šilumos laidumas yra mažiausias, su tankiu tokia pati koreliacija nepasireiškė. SS+FG tankis lyginant su SS+GK apdorotų pjuvenų kompozitu yra 14,5 % didesnis o šilumos laidumo reikšmė net 11 % mažesnė. Galima daryti prielaidą, kad kompozitų su SS+FG apdirbtomis pjuvenomis potencialiai gali sumažinti šilumos laidumo reikšmę ir išlaikyti didesnę medžiagos tankį nei kiti apdirbimo būdai.



14 pav. Šilumos laidumo bandymo rezultatai

3.6. CO₂ pėdsako įvertinimas

Kompozitų šilumos CO₂ emisijų priklausomybė nuo pjuvenų kiekio pateikta 15 paveiksle. Atlikus CO₂ emisijų skaičiavimus matoma, kad keičiant dalį cemento kiekio į medžio pjuvenas proporcingai mažėja ir CO₂ emisijos, tačiau taip pat mažėja ir kompozito gniuždymo stipris. 20 % bandiniuose CO₂ emisijų kiekis sumažėja per 8,47 % o tuo pačiu gniuždymo stipris sumažėja net per 24,5 %. Panaši tendencija aptinkama ir kitų koncentracijų bandiniuose. Tačiau, vertinant lenkimo stiprį situacija kitokia. 20 % bandiniuose, kurių CO₂ emisijų kiekis sumažėja per 8,47 % lenkimo stipris sumažėja tik per 1,8 %. 35 % bandiniuose, kurių CO₂ emisijos sumažėja per 38,10 % lenkimo stipris sumažėja tik per 10,86 %. Tai parodo, kad cemento ir apdorotų medžio pjuvenų kompozitas turi potencialo mažinant CO₂ emisijas statybų sektoriuje.



15 pav. CO₂ emisijų kiekis su vidutinėmis gniuždymo stiprio reikšmėmis (a) ir vidutinėmis lenkimo stiprio reikšmėmis (b)

3.7. Bendra diskusija apie rezultatus

Bandinių su 35% pjuvenų kiekiu bandymų rezultatai pateikti 11 lentelėje. Siekiant bendrai įvertinti viso tyrimo rezultatus, sudaroma tyrimo rezultatų lentelė, kurioje pateikta bandinių su 35 % pjuvenų kiekiu tankio, gniuždomojo ir lenkiamojo stiprio bei vandens įmirkio rezultatai. Lentelėje pasirinkta vaizduoti 35 % pjuvenų kiekio bandiniai dėl išliekamų sąlyginai gerų mechaninių ir fizikinių kompozito savybių, bei fakto, kad šilumos laidumo bandymas atliktas tik su šios pjuvenų koncentracijos bandiniais. Lentelėje nevertinami CO₂ pėdsako skaičiavimo rezultatai, nes skaičiavimas atliktas neatsižvelgiant į pjuvenų apdorojimo būdą.

Neapdorotų pjuvenų bandinių tankis (1417,3 kg/m³) bei gniuždomasis (16,99 MPa) stipris mažiausias iš visų tyrimo bandinių, taip pat didžiausias vandens įmirkis (16,30 %) ir šilumos laidumo koeficientas (0,206 W/mK). Analogiški rezultatai pastebimi Kaseasbeh'as ir Al-Qaralleh'as [20] tyrime. Kitą vertus, gautas geriausias lenkiamojo stiprio rezultatas (4,48 MPa). Vandenyje mirkytų pjuvenų bandinių rezultatai rodo šiek tiek geresnes tankio (1556,2 kg/m³), gniuždomojo stiprio (24,24 MPa) ir vandens įmirkio (11,11 %) reikšmes, tačiau mažesnę lenkiamojo stiprio (3,91 MPa) reikšmę. Apžvelgiant šiuos du bandinius galima daryti prielaidą, kad net paprastas apdirbimo būdas kaip

mirkymas vandenyje teigiamai veikia dalį kompozito savybių, ką, savo tyrimuose, pastebėjo ir Gloria ir kt. [26] ir Dias'as ir kt. [27]. Lenkiamojo stiprio reikšmė vandenyje apdorotų pjuvenų bandinyje gali būti mažesnė dėl įvairių priežasčių. Viena iš jų tai, kad mirkymas vandenyje neigiamai veikia pjuvenų natūralią savybę armuoti kompozitą. Taip pat blogesnis rezultatas galėjo būti gautas dėl bandinių gamybos metu atsiradusios sudedamųjų kompozito dalių kiekio paklaidos, tai yra po mirkymo pjuvenos tirpale tampa labiau pasisklaidžiusios, ko pasakoje kompozito tesloje yra fiziškai mažesnis pjuvenų kiekis. Šio tyrimo 2.2 skyriuje pateiktoje 8 lentelėje bandinių sudėtyje matoma, kad vandenyje apdorotų pjuvenų kiekis yra mažesnis už neapdorotų, tai dar labiau patvirtina pateiktą prielaidą lenkiamojo stiprio sumažėjimui.

SS+GK bandinio tankio ($1474,2 \text{ kg/m}^3$), gniuždomojo stiprio (23,74 MPa), vandens įmirčio (15,26 %) ir šilumos laidumo koeficiento ($0,204 \text{ W/mK}$) rodikliai pasiekė šiek tiek geresnius rezultatus už neapdorotų pjuvenų mišinį. Gauta sąlyginai geresnė gniuždomojo stiprio reikšmė. Gniuždymo rezultatui įtakos turėjo SS ir GK sąveika su medžio pjuvenomis. SS modifikavo pjuvenų paviršių, ko pasakoje papildomai formavosi C-S-H fazės, o GK tirpalas pakeitė medžio pjuvenų savybes, dėl kurių stiprėja sąveika tarp cemento ir pjuvenų. GK veikė kaip pjuvenų plovimo medžiaga, dėl kurios buvo pašalinama kenksmingos organinės medžiagos kaip cukrūs, dervos ir ligninai. Atitinkamus rezultatus savo tyrimuose gavo Małaszkiwicz'us ir kt. [36] ir Said'as [33]. Nevertinant gniuždomojo stiprio, reikšmingas rezultatų pakitimas nepastebėtas.

SS+FG tankio ($1445,4 \text{ kg/m}^3$), gniuždomojo (18,02 MPa), lenkiamojo (3,98 MPa) stiprių, ir vandens įmirčio (15,46 %) reikšmės nežymiai kinta nuo SS+GK. Matomas mažesnis gniuždomojo stiprio rezultatas, kurį galima paaiškinti FG įkomponavimu. FG šiame tyrime naudotas siekiant reguliuoti kompozito hidratacija, tačiau, kad tai vyktu efektyviai, kaip ir savo darbe minėjo Cheung'as ir kt. [40], labai svarbu tinkamas sulfato kiekis. Šio tyrimo metu to padaryti nepavyko, kadangi naudojama FG atlieka, nebuvo žinomi tokie rodikliai kaip tiksli FG cheminė sudėtis, grynumas bei aktyvumas. Nepaisant blogesnių mechaninių savybių, gauta geriausia šilumos laidumo koeficiento reikšmė ($0,185 \text{ W/mK}$). Plačiai Lietuvoje paplitusių akyto betono mūro blokelių šilumos laidumo koeficiento vertės svyruoja nuo $0,247 \text{ W/mK}$ iki $0,312 \text{ W/mK}$, tai reiškia, kad šio kompozito šilumos laidumo savybės yra nuo 33,5 % iki 68,5 % geresnės. Literatūros analizės metu tokių reikšmingų šilumos laidumo savybių rezultatų nebuvo pastebėta, todėl rekomenduojama tolimesni šiluminių bei ilgaamžiškumo savybių tyrimai su SS+FG pjuvenų apdirbimo kombinacija.

NH+GK+SD+MK pasižymėjo didžiausiomis tankio ($1602,5 \text{ kg/m}^3$), gniuždomojo stiprio (33,71 %) ir vandens įmirčio (6,31 %) savybėmis. Visos, šio apdorojimo būdo, medžiagos teigiamai veikė kompozito savybes. NH ir GK šalino hemiceliuliozę, ligniną ir kitas organines medžiagas esančias pjuvenose, SD ir MK didino kompozito tankį užpildant kompozite esančias tuštumas. Šių medžiagų kombinacija efektyviai veikė kompozito mechanines savybes. Lenkiamasis stipris (4,34 MPa) nereikšmingai mažesnis už neapdorotų pjuvenų kompozito reikšmę. Tačiau gautas didžiausias šilumos laidumo koeficiento rodiklis ($0,216 \text{ W/mK}$). Tai koreliuoja su užpildytomis kompozito poromis dėl SD ir MK naudojimo, tačiau šiluminės savybės išlieka sąlyginai geros, todėl verta taip pat tęsti tyrimus įvertinant medžiagos ilgaamžiškumą.

11 lentelė. Bandinių su 35% pjuvenų kiekiu bandymų rezultatai

Apdorojimo pavadinimas	Tankis, kg/m ³	Gniuždomasis stipris, MPa	Lenkiamasis stipris, MPa	Vandens įmirkis, %	Šilumos laidumo koeficientas, W/mK
Neapdorota	1417,3	16,99	4,48	16,30	0,206*
Vandenyje	1556,2	24,24	3,91	11,11	0,206
SS+GK	1474,2	23,74	3,61	15,26	0,204
NH+GK+SD+MK	1602,5	33,71	4,34	6,31	0,216
SS+FG	1445,4	18,02	3,98	15,46	0,185

Pastaba: šilumos laidumo reikšmė su neapdorotų pjuvenų bandiniu nenustatyta, reikšmė priimama pagal vandenyje mirkytų pjuvenų bandinį.

Bandinių su 35% pjuvenų kiekiu bandymų rezultatų normalizuotos vertės pateiktos 12 lentelėje. Siekiant išrinkti geriausią medžio pjuvenų ir cemento kompozito apdorojimo būdą sudaryta modifikuota rezultatų lentelė su normalizuotomis reikšmėmis. Taip galima įvertinti visų bandymų rezultatus ir lengviau nustatyti geriausią apdorojimo būdą. Geriausiam bandymo rezultatui priskiriamas normalizuota vertė – 5,00, blogiausiam – 0,00. Siekiant supaprastinti vertinimą, visiems bandymų rezultatams priimamas tas pats svoris. Tolimesniems tyrimams rekomenduojama rezultatų svorį vertinti kitaip rezultatų svorius priimant pagal svarbą. Kai bandymo rezultatai atitinka sąlygą didesnė vertė – didesnis įvertinimas naudojama 2 formulė, kai rezultatai atitinka sąlygą mažesnė vertė – didesnis įvertinimas naudojama 3 formulė.

$$\text{Normalizuota vertė} = 5 \cdot \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

$$\text{Normalizuota vertė} = 5 \cdot \frac{x_{\min} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

čia x – aktuali bandymo rezultato vertė;

$x_{\min}$ – aktualaus bandymo mažiausia rezultato vertė;

$x_{\max}$ – aktualaus bandymo didžiausia rezultato vertė;

Modifikavus rezultatų vertes, matoma, kad bandiniai su NH+GK+SD+MK gauna didžiausią įvertinimą (19,20). Antroje vietoje lieka apdorojimas vandenyje (11,85) ir trečioje SS+FG (8,64). Prioretizuojant mechanines savybes NH+GK+SD+MK yra tinkamiausias apdorojimo būdas, tačiau jei mechaninės kompozito savybės nėra būtinybė, tinkami ir apdorojimas vandenyje ir SS+FG. Apdorojimas vandenyje, įvertinus, kad tai mažiausiai sudėtingas apdorojimo būdas, rodo sąlyginai gerus tiek fizikinius, tiek mechaninius rodiklius. Prioretizuojant šilumos laidumo savybės, labiausiai tinkamas apdorojimo būdas SS+FG su geriausiu šilumos laidumo koeficientu. Taip pat šio apdorojimo metu naudojama pramoninė atlieka FG, ko pasakoja, šis apdirbimo būdas gali būti siejamas su šios kenksmingos atliekos antriniu panaudojimu ar utilizavimu. Neapdorotų ir SS+GK

apdorojimo būdų įvertinimai panašūs (6,61 ir 6,02) SS+GK apdorojimas reikšmingos naudos kompozito savybėms nesuteikia ir vertinant kompozito paruošimo sudėtingumą, šis apdorojimo būdas nėra rekomenduojamas. Neapdorotos pjuvenos turi vieną išsiskiriančią savybę t. y. lenkiamasis stipris, jei ši savybė aktuali, galima naudoti neapdorotas pjuvenas kompozito ruošimui. Būtina atsižvelgti į tai, kad vertinama tik 35 % pjuvenų koncentracijos bandiniai.

12 lentelė. Bandinių su 35% pjuvenų kiekiu bandymų rezultatų normalizuotos vertės

Apdorojimo pavadinimas	Tankis	Gniuždomasis stipris	Lenkiamasis stipris	Vandens įmirkis	Šilumos laidumo koeficientas	Viso
Neapdorota	0,00	0,00	5,00	0,00	1,61	6,61
Vandenyje	3,75	2,17	1,72	2,60	1,61	11,85
SS+GK	1,54	2,02	0,00	0,52	1,94	6,02
NH+GK+SD+MK	5,00	5,00	4,20	5,00	0,00	19,20
SS+FG	0,76	0,31	2,13	0,42	5,00	8,64

Išvados

1. Bandiniai su pridėtomis pjuvenomis visais atvejais nepasiekė kontrolinio bandinio tankio, tačiau kai pridėtinių pjuvenų kiekis mažas (5 %), geriausius rezultatus rodo bandiniai su SS+GK ir neapdorotomis pjuvenomis, t. y. 1 % ir 1,4 % atitinkamai pasiektas mažesnis tankis lyginant su kontroliniu bandiniu. Didinant pjuvenų kiekį (20–35 %), matoma, kad didžiausias tankis pasiektas su bandiniais, kurių apdorojimas buvo mirkymas vandenyje (20 %) ir NK+GK+SD+MK (20 %), t. y. 1690 kg/m^3 ir 1650 kg/m^3 atitinkamai. Galima teigti, kad NK+GK+SD+MK apdirbimas efektyviai sumažino kompozito tankį.
Tankio rezultatai tiesiogiai koreliuoja su gniuždymo stipriu, SS+GK ir neapdorotų pjuvenų bandiniai (5 %) pasiekė geriausius gniuždymo stiprio rezultatus, t. y. 9,5 % ir 23,1 % atitinkamai pasiektas mažesnis gniuždymo stipris lyginant su kontroliniu bandiniu. NH+GK+SD+MK (5 %) bandinys pasiekė gerus gniuždymo stiprio rezultatus, t. y. tik 19,9 % sumažėjimas lyginant su kontroliniu bandiniu. Tačiau atsižvelgiant į bandinius su didesniu pjuvenų kiekiu (20–35 %), matoma, kad NK+GK+SD+MK (20 %) pasiekė 42,59 MPa, kai mirkymas vandenyje (20 %) tik 37,43 MPa, t. y. 12,1% skirtumas. Galima daryti išvadą, kad NH+GK+SD+MK apdirbimas sėkmingai sumažina kompozito tankį ir išlaiko sąlyginai gerą gniuždymo stiprį.
Bandymo metu pastebėta, kad lenkimo stipris padidinus pjuvenų kiekį kompozite (20–35 %) didina ir lenkimo stiprį. Kontrolinio bandinio pasiektas lenkimo stipris po 14 dienų 3,96 MPa. Beveik visi bandiniai su 20 % pjuvenų pasiekė ar net pranoko kontrolinio bandinio rezultatus. Didžiausią lenkimo stiprį pasiekė bandinys su neapdorotomis pjuvenomis (20 %) 5,84 MPa ir mirkymas vandenyje (35 %) 5,67 MPa. Geriausia rezultatą pasiekęs bandinys su mineralinių priedų apdirbimo NH+GK+SD+MK (35 %) 4,55 MPa, t. y. 14,9 % geriau už kontrolinį bandinį. Galima daryti išvadą, kad apdorotų pjuvenų ir cemento kompozitas turi didelį potencialą būti naudojamas statybų sektoriuje, elementuose, kurie gali patirti lenkimo jėgas.
2. Mažos pjuvenų koncentracijos bandiniai (5–20 %) neturi didelio vandens įmirkimo pokyčio. Didinant pjuvenų kieki iki 35–50 % pjuvenų apdirbimo įtaka tampa aiškesnė. Apdorojimas su NH+GK+SD+MK efektyviai veikia vandens įgeriamumą. Su 35 % pjuvenų koncentracija pasiektas 6,31 % įgeriamumas, o su 50 % koncentracija – 17,65 %. Apibendrinant galima teigti, pjuvenų apdirbimas teigiamai veikia kompozito vandens įmirkį, bet taip pat didelę įtaką turi ir medžio pjuvenų kiekis.
3. Bandinių šilumos laidumo rezultatai tarpusavyje skiriasi nežymiai (0,185–0,216 W/mK), tačiau bandinys su SS+FG pasiekė geriausią šilumos laidumo rezultatą – 0,185 W/mK. Vandenyje apdorotų pjuvenų rezultatas – 0,206 W/mK. Galima daryti išvadą, kad pjuvenų cheminis apdirbimas pagerino šilumos laidumo savybes per 10,2 %.
4. Atlikus CO₂ pėdsako skaičiavimą pastebima, kad pjuvenų įkomponavimas tiesiogiai mažina išskleidžiama CO₂ kiekį. Didėjant pjuvenų koncentracijai, mažėja kompozito gniuždymo stipris, šis mažėjimas yra ryškesnis nei CO₂ emisijų pokytis. Kita vertus lenkimo stiprio reikšmės mažėja kur kas lėčiau, todėl bandiniai išlaiko geras lenkimo savybes atsižvelgiant į CO₂ emisijų kiekį. Apibendrinant galima teigti, kad cemento ir chemiškai apdorotų medžio pjuvenų kompozitai gali sumažinti klimato kaitos įtaką, kartu išlaikydami pakankamai geras mechanines savybes.
5. Įvertinus 35 % bandinių rezultatus, juos normalizuojant, gauta, kad NH+GK+SD+MK yra geriausias apdorojimo būdas, tačiau jei mechaninės savybės nėra pagrindinis kompozito prioritetas, didelį potencialą turi kompozitai su apdorotomis pjuvenomis vandenyje ir SS+FG.

DI naudojimo deklaracija

Šiame darbe leidžiama naudoti DI kaip pagalbinę priemonę laikantis akademines etikos, DI etiško naudojimo tvarką, laikantis bibliotekos nurodytų citavimo reikalavimų. Pvz.: teksto gramatikos bei stiliaus taisymui (niekada paties teksto generavimui ir visada išsaugojant originalią versiją, kuri nebuvo dirbtinio intelekto redaguota), pradinei informacijos paieškai ir panašiai.

Šiame darbe naudoti DI įrankiai ChatGPT, Quilbot ir Wordvice AI buvo naudojami terminų, frazių vertimui ir rašybos klaidų tikrinimui. RefWorks buvo naudojamas citavimui ir literatūros šaltinių sąrašo sukūrimui.

Literatūros sąrašas

1. LOMBORG, Bjørn. *The □ Skeptical Environmentalist*. Rev. and updated version, 1. publ. in English. 10. print. ed. Cambridge [u.a.]: Cambridge Univ. Press, 2002. ISBN 0521010683.
2. *Cement Production Global 2024*. Statista Ltd, Feb 3, 2025. Available from <<https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume>>.
3. ANDREW, Robbie M. *Global CO2 Emissions from Cement Production*. Zenodo, Feb 26, 2025. Available from <<https://search.datacite.org/works/10.5281/zenodo.831454>>.
4. BEDIAKO, Mark; and AMANKWAH, Eric. Analysis of Chemical Composition of Portland Cement in Ghana: A Key to Understand the Behavior of Cement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, vol. olume 2015. pp. 5.
5. SCHNEIDER, M., et al. Sustainable Cement Production—present and Future. *Cement and Concrete Research*, 2011, vol. 41, no. 7. pp. 642–650. Available from <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611000950>>. ISSN 0008-8846.
6. FADIEL, Ashraf A. M.; and ABU-LEBDEH, Taher. Mechanical Properties of Concrete Including Wood Shavings as Fine Aggregates. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Apr 1, 2021, vol. 14, no. 4. pp. 478–487. Available from <<https://thescpub.com/pdf/ajeassp.2021.478.487.pdf>> CrossRef. ISSN 1941-7020.
7. *S. Gentvilas: Naujų Visuomeninių Pastatų Statybose – Pusė Medžiagų Iš Atsinaujinančių Šaltinių*. Available from: <<https://am.lrv.lt/lt/naujienos/s-gentvilas-nauju-visuomeniniu-pastatu-statybose-puse-medziagu-is-atsinaujinanciu-saltiniu/>>.
8. PETROVIC, Bojana, et al. Life Cycle Assessment of a Wooden Single-Family House in Sweden. *Applied Energy*, 2019, vol. 251. pp. 113253. Available from <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919309092>>. ISSN 0306-2619.
9. RIBEIRO, Luis; and MRAD, Cyrine. *Replication Data for: A Review of Europe's Circular Economy in the Building Sector*. Instituto Politécnico de Bragança, 2022. Available from <<https://search.datacite.org/works/10.34620/dadosipb/1aiy2x>>.
10. MAIER, Dorin. A Review of the Environmental Benefits of using Wood Waste and Magnesium Oxychloride Cement as a Composite Building Material. *Materials (Basel, Switzerland)*, 20230227, Feb 27, 2023, vol. 16, no. 5. pp. 1944. doi: 10.3390/ma16051944. ISSN 1996-1944; 1996-1944; 1996-1944.
11. PUZULE, Liga, et al. Recycling Possibilities of Wood-Cement Particle Board Manufacturing Waste. *CONNECT. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies*, 2024, vol. 0. pp. 130.
12. HOU, Shuang-Xi, et al. Closed-Loop Recyclable Wood-Plastic Composite as a Sustainable Alternative to Wood: A Solution for Utilizing Wood Waste and Promoting Carbon Sequestration. *Chemical Engineering Journal*, 2024, vol. 499. pp. 156478. Available from <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894724079695>>. ISSN 1385-8947.
13. DORIN, Maier, et al. *Wood-Cement Composites: A Sustainable Approach for Mitigating Environmental Impact in Construction*. , 2024.

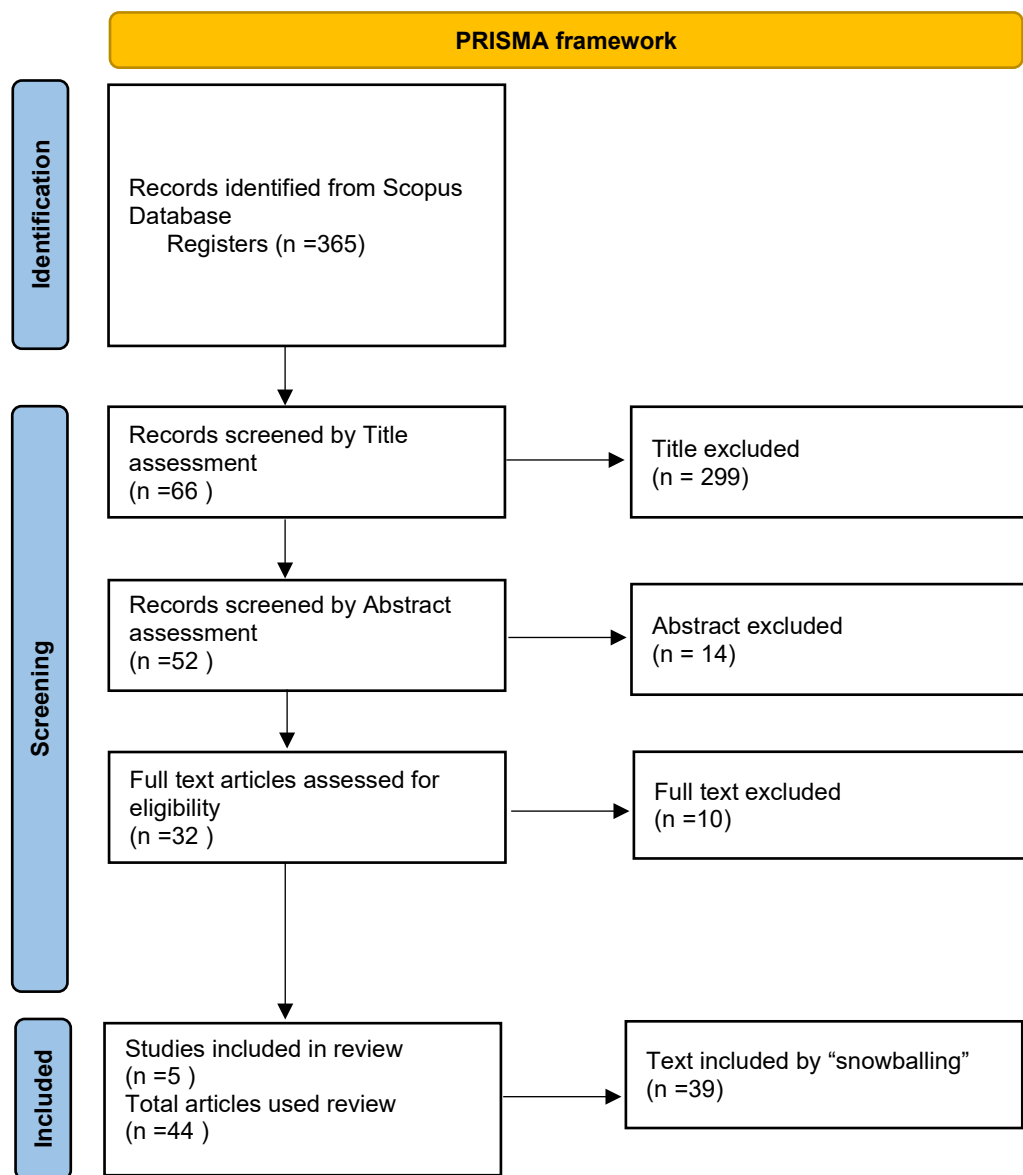
14. INCE, Ceren; TAYANÇLI, Sevaland DEROGAR, Shahram. Recycling Waste Wood in Cement Mortars Towards the Regeneration of Sustainable Environment. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 299. pp. 123891. Available from <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821016512>>. ISSN 0950-0618.
15. KRAJEWSKA, Alicja; SIEWCZYŃSKA, Monikaand GROSS, Xymena. Influence of the Addition of Pine Chips Waste on the Properties of the Concrete Mix. *Journal of Ecological Engineering*, Mar 1, 2025, vol. 26, no. 3. pp. 20–29 CrossRef. ISSN 2299-8993.
16. MAIER, Dorin. A Review of the Environmental Benefits of using Wood Waste and Magnesium Oxychloride Cement as a Composite Building Material. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 5. ISSN 1996-1944.
17. JUÁREZ-ALVARADO, César A., et al. Sustainable Proposal for Plant-Based Cementitious Composites, Evaluation of their Mechanical, Durability and Comfort Properties. *Sustainability*, Nov 1, 2022, vol. 14, no. 21. pp. 14397. Available from <<https://www.proquest.com/docview/2769919093>> CrossRef. ISSN 2071-1050.
18. OLUGBENGA, Joseph, et al. Investigation of Properties of Concrete using Sawdust as Partial Replacement for Sand. *Civil and Environmental Research*, 2014, vol. 6. pp. 35–42.
19. STR 2.05.09:2005 "Mūrinių Konstrukcijų Projektavimas. .
20. AL-KASEASBEH, Qusay; and AL-QARALLEH, Mohammad. Valorization of Hydrophobic Wood Waste in Concrete Mixtures: Investigating the Micro and Macro Relations. *Results in Engineering*, Mar, 2023, vol. 17. pp. 100877. Available from <<https://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100877>> CrossRef. ISSN 2590-1230.
21. KHELIFI, Walid, et al. Conservation Environments' Effect on the Compressive Strength Behaviour of Wood–Concrete Composites. *Materials*, May 17, 2022, vol. 15, no. 10. pp. 3572. Available from <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35629599>> PubMed. ISSN 1996-1944.
22. SHARBA, Amjad; AL-KAABI, Jasimand AL-TAAI, Salwa. The Feasibility of Improving Concrete Strength Properties by Adding Waste Wood Chips. *Journal of Applied Engineering Science*, 2023, vol. 21, no. 2. pp. 462–469 CrossRef. ISSN 1451-4117.
23. BATOOL, Farnaz, et al. Effectiveness of Wood Waste Sawdust to Produce Medium- to Low-Strength Concrete Materials. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 44. pp. 103237. Available from <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221010950>>. ISSN 2352-7102.
24. NOMAI, Jiraporn; JARAPANYACHEEP, Rapisaand JARUKUMJORN, Kasama. Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Sawdust/Poly(Lactic Acid) Composites: Effects of Alkali Treatment and Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) Content. *Macromolecular Symposia.*, Aug, 2015, vol. 354, no. 1. pp. 244–250. Available from <<https://api.istex.fr/ark:/67375/WNG-HJPBBMH4-W/fulltext.pdf>> CrossRef. ISSN 1022-1360.
25. AHMED, Wisal, et al. 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*, May 20, 2018, vol. 184. pp. 1016–1027. Available from <<https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.009>> CrossRef. ISSN 0959-6526.

26. DA GLORIA, M'hamed Y. R., et al. A Comprehensive Approach for Designing Low Carbon Wood Bio-Concretes. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 11. ISSN 1996-1944.
27. DIAS, Sara, et al. Lightweight Cement Composites Containing End-of-Life Treated Wood – Leaching, Hydration and Mechanical Tests. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 317. pp. 125931. Available from
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821036643>>. ISSN 0950-0618.
28. SHANMUGA PRIYA, D.; SAKTHIESWARAN, N. and GANESH BABU, O. Experimental Study on Mortar as Partial Replacement using Sawdust Powder and GGBS. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37. pp. 1051–1055. Available from
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532034760X>>. ISSN 2214-7853.
29. HOSSAIN, M. F.; ISLAM, M. K. and ISLAM, M. A. Effect of Chemical Treatment on the Mechanical and Physical Properties of Wood Saw Dust Particles Reinforced Polymer Matrix Composites. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 90. pp. 39–45. Available from
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814029336>>. ISSN 1877-7058.
30. PRIYA, S., et al. Characterization of Micro-Fibrillated Cellulose Produced from Sawmill Wastage: Crystallinity and Thermal Properties. *American Chemical Science Journal*, Jan 10, 2015, vol. 9, no. 1. pp. 1–8 CrossRef. ISSN 2249-0205.
31. MORJÈNE, Latifa; ALOULOU, Fadhel and SEFFEN, Mongi. Effect of Organoclay and Wood Fiber Inclusion on the Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Cement-Based Mortars. *Comptes Rendus. Chimie*, Feb 3, 2021, vol. 23, no. 11-12. pp. 733–746. Available from
<<https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/chimie/item/10.5802/crchim.42.pdf>> CrossRef. ISSN 1878-1543.
32. LIU, Ziqiang, et al. Study on Wood Chips Modification and its Application in Wood-Cement Composites. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, vol. 17. pp. e01350. Available from
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952200482X>>. ISSN 2214-5095.
33. SAID, Haytham H. Pretreatment of Sawdust for Producing Sawdust Concrete. *Engineering and Technology Journal*, Mar 1, 2013, vol. 31, no. 3. pp. 541–549. Available from
<<https://search.emarefa.net/detail/BIM-346674>> CrossRef. ISSN 1681-6900.
34. QUIROGA, A.; MARZOCCHI, V. and RINTOUL, I. Influence of Wood Treatments on Mechanical Properties of Wood–cement Composites and of Populus Euroamericana Wood Fibers. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 84. pp. 25–32. Available from
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815005090>>. ISSN 1359-8368.
35. SIDDIQUE, Rafat, et al. Utilization of Treated Saw Dust in Concrete as Partial Replacement of Natural Sand. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 261. pp. 121226. Available from
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620312737>>. ISSN 0959-6526.
36. MAŁASZKIEWICZ, Dorota; and SZTUKOWSKA, Magdalena. Utilization of Wastes from Medium Density Fiberboards Production as an Aggregate for Lightweight Cement Composite. *MATEC Web of Conferences*, Jan 1, 2018, vol. 174. pp. 2005. Available from
<<https://www.proquest.com/docview/2650005742>> CrossRef. ISSN 2261-236X.
37. HASSEN, Sawsan Abdullah; and HAMEED, Sumeyah Assim. Physical and Mechanical Properties of Sawdust Cement Mortar Treated with Hypochlorite. *IOP Conference Series. Materials*

- Science and Engineering*, Mar 1, 2020, vol. 745, no. 1. pp. 12149. Available from <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/745/1/012149>> CrossRef. ISSN 1757-8981.
38. KHAN, Mohammad Iqbal; ABBAS, Yassir M. and FARES, Galal. Enhancing Cementitious Concrete Durability and Mechanical Properties through Silica Fume and Micro-Quartz. *Sustainability*, Nov 1, 2023, vol. 15, no. 22. pp. 15913. Available from <<https://www.proquest.com/docview/2893354766>> CrossRef. ISSN 2071-1050.
39. ADAMU, Musa, et al. Mechanical Properties and Durability Performance of Concrete Containing Calcium Carbide Residue and Nano Silica. *Materials*, Nov 17, 2021, vol. 14, no. 22. pp. 6960. Available from <<https://www.proquest.com/docview/2602146610>> CrossRef. ISSN 1996-1944.
40. CHEUNG, J., et al. Impact of Admixtures on the Hydration Kinetics of Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, Dec 1, 2011, vol. 41, no. 12. pp. 1289–1309. Available from <<https://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.005>> CiNii Research of NDL. ISSN 0008-8846.
41. Doudart de la Grée, G. C. H.; YU, Q. L. and BROUWERS, H. J. H. Assessing the Effect of CaSO₄ Content on the Hydration Kinetics, Microstructure and Mechanical Properties of Cements Containing Sugars. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 143. pp. 48–60. Available from <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817304294>>. ISSN 0950-0618.
42. *Cementas. 1 Dalis. Įprastinių Cementų Sudėtis, Techniniai Reikalavimai Ir Atitikties Kriterijai / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2011th ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2012.
43. MACÍAS, Francisco, et al. An Anomalous Metal-Rich Phosphogypsum: Characterization and Classification According to International Regulations. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, vol. 331. pp. 99–108. Available from <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389417300961>>. ISSN 0304-3894.
44. AKFAS, Fatima, et al. Exploring the Potential Reuse of Phosphogypsum: A Waste Or a Resource?. *Science of the Total Environment*, 2024, vol. 908. pp. 168196. Available from <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723068237>>. ISSN 0048-9697.
45. GONG, Yuanyuan, et al. A Sustainable Composite Cementitious Material Manufactured by Phosphogypsum Waste. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 24. ISSN 2076-3417.
46. *Cemento Bandymų Metodai. 3 Dalis. Rišimosi Trukmių Ir Tūrio Pastovumo Nustatymas / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2017th ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017.
47. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 7 Dalis. Sukietėjusio Betono Tankis / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2019th ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020.
48. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 4 Dalis. Gniuždymo Stipris. Bandymo Mašinų Techniniai Reikalavimai / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2025th ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2025.
49. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 5 Dalis. Bandinių Lenkimo Stipris / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2019th ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2022.

50. *Mūro Gaminių Bandymo Metodai. 21 Dalis. Keraminių Ir Silikatinių Mūro Gaminių Vandens Įmirkio Nustatymas Panardinant Juos Į Šaltą Vandenį / Lietuvos Standartizacijos Departamentas.* 2011th ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2013.
51. *Šiluminės Statybinių Medžiagų Ir Gaminių Savybės. Šiluminės Varžos Nustatymas Apsaugotos Karštosios Plokštės Ir Šilumos Srauto Matuoklio Metodais. Didelės Ir Vidutinės Šiluminės Varžos Gaminiai / Lietuvos Standartizacijos Departamentas.* 2002nd ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
52. *Fox 314 - TA Instruments.* Available from: <https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/Fox304_open.jpg>.
53. XU, Aiyan, et al. Carbon Emission Calculation of Prefabricated Concrete Composite Slabs during the Production and Construction Stages. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 80. pp. 107936. Available from <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223021162>>. ISSN 2352-7102.
54. *CEM I 42.5 R (ULTRA CEM 42,5) Environmental Product Declaration.* Available from <<https://www.heidelbergmaterials.bg/sites/default/files/2024-10/3.EPD-CEM-I-42.5-R-ULTRA-CEM-42%2C5-EN-v5.pdf>>.
55. *Wood Pellets as bulk Environmental Product Declaration.* Available from <<https://www.environdec.com/library/epd16907>>.

1 priedas. PRISMA diagrama



2 priedas. Tyrimo literatūros apžvalgos protokolas

Specialiai apdirbtų pjūvenų ir cemento kompozito savybių tyrimas

Skikol

Medžio pjūvenos - tai, organinė medžiaga, kuri gali pagerinti tam tikras betono savybes. Tyrimo tikslas - nagrinėti kaip medžio drožlių išankstinis apdorojimas daro įtaką betono savybėms. Ši medžiaga yra pilnai atsinaujinanti, dėl to jos kompozitas su cementu yra draugiškas aplinkai sprendimas.

Planning

PICOC

- **Population:** Concrete
- **Intervention:** treated wood particles
- **Comparison:**
- **Outcome:** mechanical properties, workability, water absorption
- **Context:**

Research Questions

1. How different types of wood sawdust treatment influence mechanical properties of sawdust - cement composite
2. How different types of wood sawdust treatment influence workability of sawdust - cement composite
3. How different types of wood sawdust treatment influence water absorption properties of sawdust - cement composite
4. How different types of wood sawdust treatment influence thermal properties of sawdust - cement composite

Keywords and Synonyms

Keyword	Synonyms
Concrete	cement, cement composite, mortart
Thermal properties	
mechanical properties	bend*, compression, flex*, split*, strength, tension
treated sawdust	Treated wood, Treated wood shavings, chemical treat*, treated wood fib*, treated

wood fib*, treated wood wool, treated woodchips

water absorption

workability

Search String

("Concrete" OR "cement" OR "cement composite" OR "mortart") AND ("treated sawdust" OR "Treated wood" OR "Treated wood shavings" OR "chemical treat*" OR "treated wood fib*" OR "treated wood fib*" OR "treated wood wool" OR "treated woodchips") AND ("Thermal properties" OR "mechanical properties" OR "bend*" OR "compression" OR "flex*" OR "split*" OR "strength" OR "tension" OR "water absorption" OR "workability")

Sources

- Science@Direct (<http://www.sciencedirect.com>)
- Scopus (<http://www.scopus.com>)

Selection Criteria

Inclusion Criteria:

- English
- full text available
- newer than 2015

Exclusion Criteria:

- Older than 2015
- not in English

Quality Assessment Checklist

Questions:

Answers:

Data Extraction Form

Conducting

Digital Libraries Search Strings

Science@Direct:

("Concrete" OR "cement" OR "cement composite" OR "mortart") AND ("treated sawdust" OR "Treated wood" OR "Treated wood shavings" OR "treated wood fib*" OR "wood" OR "wood fib*" OR "woodchips") AND ("mechanical properties" OR "bend*" OR "compression" OR "flex*" OR "split*" OR "strength" OR "tension" OR "water absorption" OR "workability")

Scopus:

("Concrete" OR "cement" OR "cement composite" OR "mortart") AND ("treated sawdust" OR "Treated wood" OR "Treated wood shavings" OR "chemical treat*" OR "treated wood fib*" OR "treated wood fib*" OR "treated wood wool" OR "treated woodchips") AND ("Thermal properties" OR "mechanical properties" OR "bend*" OR "compression" OR "flex*" OR "split*" OR "strength" OR "tension" OR "water absorption" OR "workability")

Imported Studies

- **Science@Direct:** 0
- **Scopus:** 365

3 priedas. Tyrimo dizaino diagrama

