



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Medžio pjuvenų panaudojimas dirbtinio užpildo gamyboje ir dirbtinių užpildų analizė

Baigiamasis magistro projektas

Klementina Leonavičiūtė

Projekto autorė

Doc. Evaldas Šerelis

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Medžio pjuvenų panaudojimas dirbtinio užpildo gamyboje ir dirbtinių užpildų analizė

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Klementina Leonavičiūtė

Projekto autorė

Doc. Evaldas Šerelis

Vadovas

Prof. Vitoldas Vaitkevičius

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Klementina Leonavičiūtė

Medžio pjuvenų panaudojimas dirbtinio užpildo gamyboje ir dirbtinių užpildų analizė

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.

Klementina Leonavičiūtė

Patvirtinta elektroniniu būdu



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija	
Baigiamojo projekto tema (tematika, lietuvių k.): Medžio pjuvenų panaudojimas dirbtinio užpildo gamyboje ir dirbtinių užpildų analizė	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: 2025 m. gruodžio 1 d. Nr. V25 09-35	
(lietuvių k.): Medžio pjuvenų panaudojimas dirbtinio užpildo gamyboje ir dirbtinių užpildų analizė	
(anglų k.): Utilization of Wood Sawdust in Artificial Aggregate Production and Analysis of Artificial Aggregates	
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:	
Konsultacijų laikas (su vadovu ir/ar konsultantu suderintas kassavaitinis konsultacijų laikas, kuris įvedamas į AIS, nurodant studento vidinį vidko kodą):	
Trečiadieniais 9:00 – 10:30	

Vadovas:	Doc. Evaldas Šerelis
(indēlis 100 %)	<i>pareigos, vardas, pavardē</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Klementina Leonavičiūtė
	<i>vardas, pavardē</i>
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Leonavičiūtė, Klementina. Medžio pjuvenų panaudojimas dirbtinio užpildo gamyboje ir dirbtinių užpildų analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Evaldas Šerelis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: lengvasis dirbtinis užpildas, medžio pjuvenos, cementas, skalūniniai pelenai, gniuždomasis stipris, biokompozitas.

Kaunas, 2026. 55 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe siekiama įvertinti, pagaminto dirbtinio užpildo iš medžio pjuvenų, granulių tinkamumą betonui, palyginant jį su kitais užpildais bei betonais be užpildo. Tyrimas atliktas taikant pusiau adiabatinio kalorimetro bandymus, skalumo bandymą, lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio tyrimus, susitraukimo deformacijų matavimus, poringumo ir vandens įgeriamumo analizę. Taip pat įvertintas šaldymo–atšildymo ciklų poveikis bandinių patvarumui ir apskaičiuotas potencialus CO₂ kiekio sumažėjimas keičiant tradicinius užpildus medienos pagrindo granuliuotu dirbtiniu užpildu.

Pagaminti lengvieji dirbtiniai užpildai, kurie naudojami tolimesniems tyrimams skiediniuose, keičiant smėlį užpildu. Gauti rezultatai eksperimentinėje dalyje parodė, kad medžio pjuvenų pridėjimas mažina hidratacijos metu išsiskiriančią šilumą. Pridėjus cheminių priedų, temperatūra pradžioje pakyla, o hidratacija vyksta greičiau. Nustatyta, kad medžio pjuvenų granulių piltnis tankis beveik dvigubai didesnis nei keramzito ir putstiklio granulių. Bandiniai daugiausia traukėsi pirmosiomis dviem savaitėmis, vėliau tempimo deformacijos stabilizavosi. Tyrimas rodo, kad medžio pjuvenų granulių užpildas gali būti perspektyvus tvaresnių betono mišinių komponentas, galintis prisidėti prie CO₂ pėdsako mažinimo. Viso pateikta 19 lentelių, 36 paveikslėliai, remtasi 62 literatūros šaltiniais.

Leonavičiūtė, Klementina. Utilization of Wood Sawdust in Artificial Aggregate Production and Analysis of Artificial Aggregates / supervisor Assoc. Prof. Dr. Evaldas Šerelis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: lightweight artificial aggregate, wood sawdust, cement, oil shale ash, compressive strength, biocomposite.

Kaunas, 2026. 55 p.

Summary

This study evaluates the suitability of an artificial wood-sawdust-based aggregate for concrete. The performance of this aggregate was compared with other aggregates and concrete without aggregate. The experimental program included semi-adiabatic calorimetry, flexural and compressive strength tests, shrinkage deformation measurements, porosity, and water absorption analysis. Additionally, the resistance to salt-scaling was assessed, and the potential CO₂ reduction achieved by replacing traditional aggregates with wood-based granules was calculated.

Lightweight artificial aggregates were produced and later used in mortars for further experiments, replacing sand in the mixtures. The results in the experimental part showed that the addition of wood sawdust reduces the heat released during hydration. When chemical admixtures were incorporated, the initial temperature increased and hydration accelerated. The bulk density of wood-sawdust granules was found to be twice that of expanded clay and foam glass granules. Most shrinkage occurred within the first two weeks, after which the deformation gradually stabilized. Overall, the findings indicate that wood-sawdust granules represent a promising sustainable aggregate alternative, potentially contributing to reduced CO₂ emissions in concrete production. Masters' final work contains 19 tables, 36 figures, 62 references.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Paveikslų sąrašas	11
Santrumpų ir terminų sąrašas	12
Įvadas.....	13
1. Literatūros analizė.....	15
1.1. CO ₂ emisijų tendencijos pasaulyje	15
1.2. Medžio struktūros analizė.....	16
1.3. Medžio pjuvenų įtaka biokompozito pagrindinėms savybėms	18
1.3.1. Gniuždomasis ir lenkiamasis stipris	18
1.3.2. Šiluminis laidumas	19
1.3.3. Vandens įgeriamumas	20
1.4. Medžio pjuvenų paruošimo būdai	20
1.4.1. Kalcio nitrato įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui su medžio pjuvenomis	21
1.4.2. Kalcio formiato įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui	21
1.4.3. Kiti cheminiai priedai	22
1.5. Skalūniniai pelenai	23
1.6. Dirbtinio užpildo gamybos technologija	24
1.7. Literatūros analizės išvados.....	25
2. Tyrimų metodologija.....	26
2.1. Naudotos medžiagos.....	26
2.1.1. Cementas	26
2.1.2. Skalūniniai pelenai	27
2.1.3. Vanduo	27
2.1.4. Medžio pjuvenos	27
2.1.5. Cheminiai priedai	27
2.1.6. Smėlis	27
2.1.7. Superplastiklis	28
2.1.8. Keramzito užpildas	28
2.1.9. Granuluotas putstiklis.....	28
2.2. Tyrimo metodai	29
2.2.1. Pusiau adiabinis kalorimetro tyrimas	29
2.2.2. Skalumo bandymas.....	30
2.2.3. Skiedinių bandinių formavimas.....	30
2.2.4. Lenkiamasis stipris	30
2.2.5. Gniuždomasis stipris	30
2.2.6. Susitraukimo deformacijos.....	30
2.2.7. Poringumo ir vandens įgeriamumo nustatymas	31
2.2.8. Paviršinio šaldymo ir atšildymo metodas.....	32
2.2.9. CO ₂ kiekio skaičiavimas.....	32
3. Tyrimų rezultatai ir diskusija	34
3.1. Pusiau adiabinis kalorimetro tyrimas	34
3.1.1. Skalūninių pelenų įtaka hidratacijai	34
3.1.2. Medžio pjuvenų įtaka cemento ir skalūninių pelenų rišiklio hidratacijos procesams	35
3.1.3. Kalcio nitrato įtaka hidratacijos procesams.....	36

3.1.4. Kalcio formiato įtaka hidratacijos procesams	36
3.2. Medžio pjuvenų apdorojimas, mišinio sudėtis ir granuliavimas	37
3.3. Užpildų piltinio tankio tyrimo rezultatai	39
3.4. Užpildų granuliometrijos tyrimo rezultatai	39
3.5. Dirbtinio užpildo mechaninių savybių tyrimas skalumo metodu.....	41
3.6. Dirbtinio užpildo įtaka pagrindinėms skiedinio savybėms	41
3.6.1. Tankis	42
3.6.2. Lenkimo stiprio tyrimas	43
3.6.3. Gniuždymo stiprio tyrimas	43
3.6.4. Susitraukimo deformacijų tyrimas	44
3.6.5. Poringumo ir vandens įgeriamumo tyrimas	45
3.6.6. Atsparumo šalčiui tyrimas.....	46
3.6.7. CO ₂ kiekio skaičiavimas.....	47
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Šiluminio laidumo ir tankio reikšmės su skirtingomis mišinio sudėtimis.....	20
2 lentelė. Skalūninių pelenų cheminė sudėtis [56].....	23
3 lentelė. Cemento CEM II mechaninės, fizikinės ir cheminės savybės	26
4 lentelė. Naudotų skalūninių pelenų cheminė sudėtis	27
5 lentelė. Superplastiklio techniniai duomenys.....	28
6 lentelė. Keramzito granulių techniniai duomenys.....	28
7 lentelė. Putstiklio granulių techniniai duomenys	29
8 lentelė. Dirbtinio užpildo gamybos GWP (A1–A3) rodikliai	33
9 lentelė. Skiediniams pagaminti reikalingų medžiagų GWP (A1–A3) rodikliai.....	33
10 lentelė. Cemento ir skalūninių pelenų sudėtis cementinei tešlai.....	34
11 lentelė. Cemento, skalūninių pelenų ir medžio pjuvenų sudėtis cementinei tešlai	35
12 lentelė. Cemento, skalūninių pelenų, medžio pjuvenų ir kalcio nitrato sudėtis cementinei tešlai	36
13 lentelė. Cemento, skalūnų pelenų, medžio pjuvenų ir kalcio formiato sudėtis cementinei tešlai	37
14 lentelė. Gamintų dirbtinių užpildų sudėtys	38
15 lentelė. Piltinio tankio tyrimo rezultatai.....	39
16 lentelė. Skiedinių, naudotų bandiniams, sudėtys	42
17 lentelė. Poringumo ir vandens įgeriamumo matavimai.....	45
18 lentelė. Dirbtinio užpildo su medžio pjuvenomis paskaičiuotas CO ₂ pėdsakas	47
19 lentelė. Naudotų medžiagų paskaičiuotas CO ₂ pėdsakas.....	47

Paveikslų sąrašas

1 pav. CO ₂ pėdsakas skirtingose srityse [20]	15
2 pav. Medžio pjuvenų skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM) nuotrauka [24].....	17
3 pav. Medžio pjuvenų XRD spektrograma [24]	18
4 pav. Medžio pjuvenų įtaka sukiėtėjusio betono gniuždomajam stipriui [39]	19
5 pav. Šiluminio laidumo ir tankio reikšmės	20
6 pav. Vandens įgeriamumo (%) grafikas	20
7 pav. Kalcio nitrato įtaka portlandcemenčio hidratacijos proceso metu išsiskiriančiai temperatūrai [49]	21
8 pav. Kalcio formato (CF) poveikis portlandcemento (PC) hidratacijai [50]	22
9 pav. Neapdorotų ir natrio hidroksidu apdorotų pjuvenų kristalinės struktūros XRD spektras [48]	22
10 pav. Skalūninių pelenų SEM mikrografija ir XRD analizė. C: kalcio oksidas, S: silicio oksidas, A: aliuminio oksidas, I: ferito oksidas, M: magnio oksidas, N: natrio oksidas [57].	23
11 pav. Kelias iki granulių susidarymo [60]	25
12 pav. Granuliavimo metodo praktinis pritaikymas pramonėje [59]	25
13 pav. Naudotos medžio pjuvenos	27
14 pav. Smėlio integralinis ir diferencialinis pasiskirstymas pagal dalelių dydį	28
15 pav. Naudotos keramzito granulės	29
16 pav. Naudotos pusto stiklo granulės	29
17 pav. Susitraukimų matavimo bandymo prietaisas.....	31
18 pav. Skalūninių pelenų įtaka cemento hidratacijos procesui	34
19 pav. Medžio pjuvenų įtaka cemento ir skalūninių pelenų hidratacijos procesui.....	35
20 pav. Kalcio nitrato įtaka cemento, skalūninių pelenų ir medžio pjuvenų hidratacijos procesui..	36
21 pav. Kalcio formiato įtaka cemento, skalūninių pelenų ir medžio pjuvenų hidratacijos procesui	37
22 pav. Dirbtinio užpildo, naudojant kalcio nitrata ir kalcio formiatą, gamybos schema	38
23 pav. Dirbtinis užpildas perskeltas per pusę a) gamybos metu; b) ir c) po 7 parų kietėjimo	39
24 pav. Naudoti užpildai granuliometrijos tyrimui: a) granuliuotas putstiklis; b) keramzito užpildas; c) medžio pjuvenų granulės su KF; d) medžio pjuvenų granulės su KN;	40
25 pav. Santykinis dalelių pagal dydį pasiskirstymas	40
26 pav. Suminis dalelių pagal dydį pasiskirstymas.....	41
27 pav. Pagaminto dirbtinio užpildo, naudojant medžio pjuvenas, keramzito ir putstiklio, stiprumas taikant skalumo metodą	41
28 pav. Bandinių tankio rezultatai	42
29 pav. Lenkiamojo stiprio rezultatai	43
30 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai	44
31 pav. Užpildo įtaka tirto skiedinio susitraukimo deformacijoms	44
32 pav. Dirbtinio užpildo įtaka tiriamo skiedinio vandens įgeriui.....	45
33 pav. Tirtų užpildų įtaka atviram, uždaram ir pilnam poringumui	46
34 pav. Masės nuostoliai po 100 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklą 3 procentų NaCl tirpale....	46
35 pav. Vizuali apžiūra, prieš (a) ir po (b) 100 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklą 3 procentų NaCl tirpale 1) bandinys su putstiklio užpildu; 2) bandinys su keramzito granulėmis; 3) kontrolinis bandinys; 4) bandinys su medžio pjuvenų granulėmis.....	47
36 pav. Skiedinių CO ₂ pėdsako rodikliai	48

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

A1–A3 – gyvavimo ciklai, kurie apibūdina žaliavų tiekimo ir gamybos procesus;

CO₂ – anglies dioksidas;

GWP – (angl. – Global Warming Potential) visuotinis atšilimo potencialas;

KF – medžio pjuvenų ir kalcio formiato užpildas;

KN – medžio pjuvenų ir kalcio nitrato užpildas;

KZ – bandinys, kurio skiedinyje yra keramzito, kuris pakeitė dalį smėlio;

MP – bandinys, kurio skiedinyje yra medžio pjuvenų ir kalcio nitrato užpildo, kuris pakeitė dalį smėlio;

PS – bandinys, kurio skiedinyje yra putstiklio, kuris pakeitė dalį smėlio;

REF – bandinys, kurio skiedinyje nėra dirbtino užpildo;

Įvadas

Statybų sektoriaus išskiriamo CO₂ emisijų kiekio problema aktuali jau visą pastarąjį dešimtmetį, tad netrūksta diskusijų kaip tai spręsti. 2019 metais gruodžio mėnesį Europos komisija pradėjo itin ambicingos strategijos, susijusios su aplinkos politika, įsteigimą, ji vadinama Europos žaliuoju kursu. Siekiama iki 2050 metų Europai tapti CO₂ emisijoms neutraliu žemynu [1]. Statybų pramonei aktualiausi tikslai – tvarumas, žiedinės ekonomikos praktika, efektyvus energijos naudojimas ir efektyvus turimų išteklių panaudojimas. Lietuvos Respublikos Seimas atsižvelgė ir, siekiant didinti antrinių žaliavų naudojimą, pranešė apie naują tvarką – įpareigojama taikyti ne mažiau kaip 50 % atsinaujinančių gamtinių žaliavų, kurie gali būti iš medienos arba kitų organinių statybos medžiagų nuo 2024 metų lapkričio mėnesio administraciniams, transporto, kultūros, mokslo ir sporto pastatams, o nuo 2028 metų – visiems naujos statybos visuomeniniams pastatams [2, 3].

Betonas yra viena plačiausiai šiuolaikinėje infrastruktūroje naudojamų statybinių medžiagų dėl savo paprasto gamybos proceso, ekonomiškumo ir didelio stiprumo [4]. Tad sukomponavus tokias medžiagas kaip betonas su medienos užpildu gali būti šios naujovės dalis, siūlančios tvarias alternatyvas tradicinėms statybinėms medžiagoms [5]. Todėl mokslininkai atlieka tyrimus susijusius su šiuo kompozitu, tikėdamiesi sumažinti neigiamą poveikį mechaninėms betono savybėms. Labai svarbu yra atrasti tinkamą medžio pjuvenų apdorojimo metodą.

Darbo problematika

Naudojant įvairias atliekas cementinėse sistemose dažnai pastebimas reikšmingas cemento hidratacijos proceso sulėtėjimas. Analogiška tendencija būdinga ir medžio pjuvenoms, kuo jos smulkesnės, tuo labiau stabdomi portlandcemenčio hidratacijos procesai. Kita svarbi problematika yra ta, kad medžio pjuvenos ženkliai sumažina gniuždomąjį stiprį, todėl būtina rasti racionalų jų kiekį, leidžiantį gauti praktinėms reikmėms tinkamą produktą. Cementas yra vienas taršiausių statybos produktų, nes 1 kg cemento gamybos metu išskiriama apie 0,8 kg CO₂. Tuo tarpu mediena, priklausomai nuo rūšies ir apdorojimo, gali sugerti CO₂ emisijas, todėl 1 kg medienos gali atitikti net iki –2 kg CO₂. Tokiu būdu medžio pjuvenų atliekų panaudojimas leidžia sukurti ženkliai ekologiškesnį produktą.

Darbo tikslas

Naudojant medžio pjuvenas sukurti bio dirbtinį kompozitą, ištirti jo pagrindines fizikines ir mechanines savybes bei palyginti su analogiškais rinkoje esančiais dirbtiniais produktais.

Darbo uždaviniai

1. ištirti medžio pjuvenų įtaką portlandcemenčio hidratacijos procesams;
2. sukurti dirbtinio užpildo gamybos technologiją naudojant medžio pjuvenas;
3. ištirti sukurto dirbtinio užpildo pagrindines fizikines ir mechanines savybes bei palyginti su rinkoje esančiais analogiškais užpildais;
4. ištirti pagaminto dirbtinio užpildo įtaką sukietėjusio betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei nustatyti atsparumą paviršiniam šaldymui ir atšildymui.

Darbo naujumas

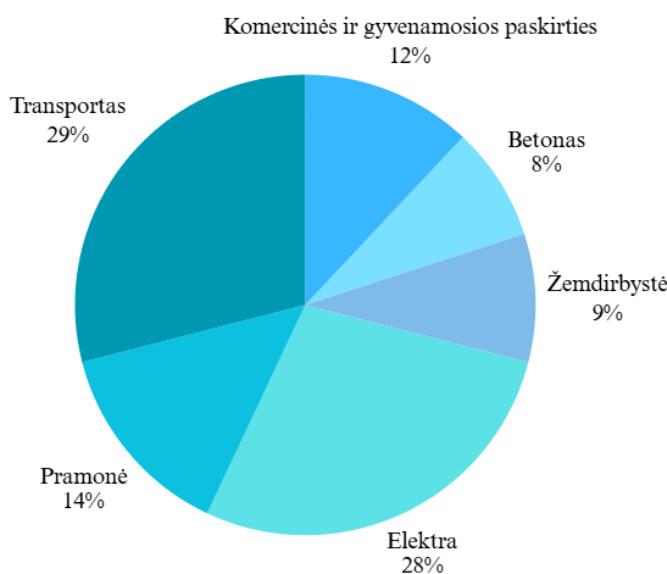
Sukurta nauja užpildo sudėtis, naudojant granuliavimo technologijos derinį su pjuvenomis ir skalūniniais pelenais. Šis dirbtinis užpildas atneštų praktinę naudą betono pramonės požiūriu, kadangi gamybos technologija yra nesudėtinga, o CO₂ pėdsakas ženkliai sumažinamas. Pakeitus smėlį šiuo dirbtiniu užpildu, sumažinamas konstrukcijos tankis, tad konstrukcija tampa lengvesnė. Tai reiškia, kad apkrova pamatui yra mažesnė nei įprastai. Šį dirbtinį užpildą galima pritaikyti skiediniams, kurie naudojami vidinėms pertvaroms, grindims, borteliams ar kitiems betonams, kur nereikalingas aukštas mechaninis atsparumas.

1. Literatūros analizė

1.1. CO₂ emisijų tendencijos pasaulyje

Europos įsipareigojimas tapti pirmuoju klimatui neutraliu žemynu paskatino daugybę ambicingų iniciatyvų, pavyzdžiui Europos žaliąjį kursą (EGD) [1], kuriuo siekiama pamažinti emisijas Europos Sąjungoje. Pagal šią iniciatyvą, ES nustatė tikslą iki 2030 metų sumažinti anglies dvideginio išmetimą (CO₂) bent 55 % ir iki 2050 metų pasiekti nulinį išmetamųjų teršalų kiekį. Remiantis naujausiomis prognozėmis, 2030 metais ES pasieks 48 % sumažintą CO₂ kiekį, palyginti su 1990 metais [6]. Nors tai yra puikus pasiekimas mažinant CO₂, vis dar yra 7 % atotrūkis, kad būtų pasiektas užsibrėžtas tarpinis tikslas. Remiantis tarptautinės energetikos agentūros duomenimis, 2024 metais pasaulinės CO₂ emisijos pasiekė rekordinį 37,8 mlrd. tonų lygį, tai yra 0,8 % padidėjimas lyginant su 2023 metais. Tačiau to priežastis tikrai nėra Europa. Kinija, Indija ir kitos besivystančios ekonomikos prisidėjo prie šio augimo, o ES ir JAV emisijos sumažėjo [7]. 2022 metais Lietuvoje energijos sektoriaus CO₂ emisijos sudarė 11 mln. tonų, tai yra apie 0,03 % pasaulinių emisijų, lyginant su 2000 metais, įvyko 8 % padidėjimas [8]. Kitose Baltijos šalyse rodikliai yra žemesni nei Lietuvoje, Latvijoje 6 mln. tonų CO₂ (sudaro 0,02 % pasaulinių emisijų), Estijoje 10 mln. tonų CO₂ (sudaro 0,03 % pasaulinių emisijų) [9, 10]. Daugiausiai Europoje 2022 metais emisijų sugeneravo Vokietija – 612 mln. tonų CO₂ (sudaro 1,79 % pasaulinių emisijų), o šis kiekis sudaro 25 % Europos emisijų [11].

Išmetamųjų teršalų apstu įvairiose srityse – žemdirbystėje, pramonėje, transportavimo ir kt., tačiau išskirtinai statybos pramonėje didžiausias CO₂ generatorius yra cemento naudojimas. Šiai dienai be cemento neapsieinama nei vienoje statybų aikštelėje, kadangi jis naudojamas kaip pagrindinis komponentas betono gamybai. Betono CO₂ išmetamųjų dujų kiekis siekia 6–8 % viso pasaulio išmetamųjų emisijų; (žr. 1 pav.) [12]. Cemento gamyba įtraukia kalcinavimą – kalkakmenio kaitinimo krosnyje 1450 °C temperatūroje procesą, kuris ir sugeneruoja didžiausius kiekius CO₂ [13]. Cemento gamybai per metus reikia 0,92 mln. tonų kalkakmenio, kurio kasybos metu naudojamos mašinos, kurių elektros sunaudojimas taip pat išskiria CO₂. Songas ir kt. įvertino, kad 1 kg cemento bendrai išskiria apie 678 kg CO₂ e/t, kur net 88 % priskiriami kalcinavimui [14].



1 pav. CO₂ pėdsakas skirtingose srityse [20]

Taip pat, betono gamybai tradiciškai naudojama žaliava – smėlis. Šios medžiagos naudojimas stipriai veikia pasaulines atsargas, nes naudojant smėlį iš dykumų, net ir jį apdorojus, gaunamos mažiau patvarios konstrukcijos [15]. Nustatyta, kad betono gamyboje stambūs užpildai yra taip pat didelis CO₂ šaltinis, kuris sukelia bendrąjį išmetamųjų dujų kiekį padidina 13–20 %. Didžiąją dalį CO₂ emisijų gaminant stambius užpildus sudaro elektra, paprastai apie 80 % [16]. Todėl jau ne pirmi metai, kaip mokslininkai bando ištirti įvairių medžiagų atliekų papildytą betono kompozitą, kurio gamybos procesas generuotų mažiau CO₂ į aplinką.

Medienos panaudojimas labai prisideda prie CO₂ emisijų mažinimo statybose, nes ši organinė medžiaga yra sugerianti, todėl jos didesnių kiekių įtraukimas konstrukcijose, mažina išmetamųjų teršalų kiekį efektyviausiai. Augimo metu medžiai sugeria anglies dioksidą iš atmosferos į savo biomasę – medieną, šaknis ir lapus. Dalis sausos medienos masės sudaro anglis (apie 50 %), vadinasi, iš medienos pagaminti gaminiai sukaupę anglį izoliuoja visą gaminio gyvavimo laiką [17]. Palyginimui, Hemmati ir kt. atliko tyrimą, kurio metu gelžbetonio konstrukcijos pakeičiamos medinėmis, ir nustatė, kad tokiu būdu išmetamųjų dujų kiekis sumažėja 43 % [18]. Tačiau cemento sunaudojimas ir toliau kyla, tai įrodo, kad medinių konstrukcijų naudojimas didėja minimaliai, o gelžbetoniniai pastatai išlieka populiariausi. Mokslininkai Dzhurko ir kt. teigia, kad sukauptos ir gamybos metu išmetamos anglies kiekis yra daug didesnis medienos gaminiuose (iki 5) lyginant su kitomis mineralinėmis medžiagomis (iki 0,2), o tai pabrėžia dvigubą medienos naudą – mažesnę emisiją ir anglies kaupimąsi [19]. Siekiant inkorporuoti kuo daugiau medienos statyboje, nebūtina naudoti tik pilnai medinės konstrukcijas. Kompozitinės medžiagos, kurių vienas iš komponentų yra organinė medžiaga – mediena, taip pat padarytų teigiamą įtaką statybinių konstrukcijų industrijai.

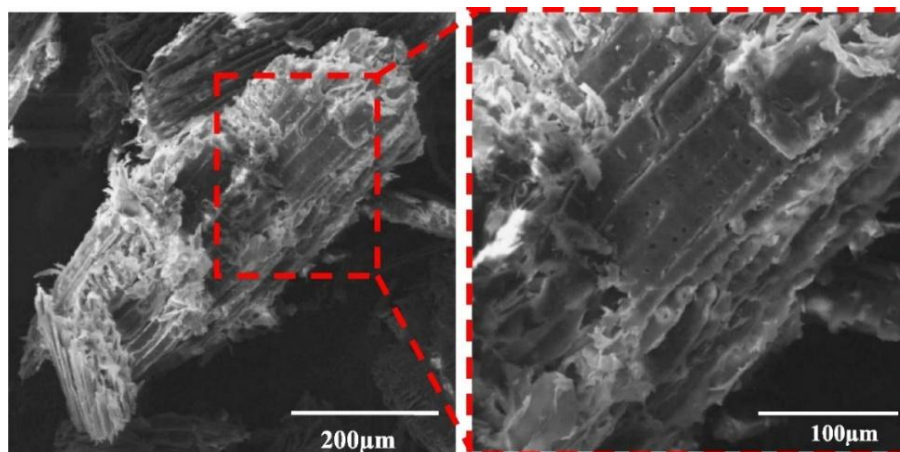
1.2. Medžio struktūros analizė

Medžio pjuvenos – tai smulkios dalelės, susidarančios apdirbant medieną įvairiais technologiniais procesais, pavyzdžiui pjaunant, obliuojant, šlifuojant ar frezuojant [21]. Pačių pjuvenų fizinės ir cheminės savybės gali labai skirtis priklausomai nuo medžio rūšies, geografinės padėties, pjovimo technikos ir dalelių dydžio [22]. Priklausomai nuo atliekamo proceso, jų kiekis, struktūra ir savybės gali būti įvairios: stambesnės pjuvenos dažniausiai išsiskiria pjovimo metu, o smulkesnės – šlifavimo ar obliavimo metu. Kai kuriose pramonės šakose naudojami technologiniai procesai su mediena palieka medienos atliekas, o kiti, dėl esminių apdirbimo skirtumų, pjuvenų nepalieka. Siekiant, kad atliekų nesusidarytų, vienas iš būdų yra įtraukti pačias pjuvenas į technologinį procesą, naudojant jas kaip kurą arba naudoti kaip žaliavą [23]. Tačiau, pramonės srityse, kuriose tai nėra įtraukta į technologinį procesą ir medienos atliekos susidaro, trūksta sprendinių kaip jas utilizuoti. Jungtinės Amerikos Valstijos pagamina 3 mln. tonų pjuvenų kiekvienais metais, kurių didžioji dalis nukeliauja tiesiai į sąvartynus [24]. Dėl nekontroliuojamo tolygiai didėjančių medienos atliekų kaupimosi didėja grėsmė gaisrams, trūksta vietos sąvartynuose, taip pat gali kelti didelį pavojų aplinkai, pavyzdžiui, dėl biologinio skaidymosi gali susidaryti šiltnamio efektą sukeliančios dujos, taip pat deginimo metu išsiskiriančios toksiškos medžiagos, konservantų iš medienos atliekų nutekėjimas į dirvožemį [25].

Ne visos medžio pjuvenos yra vienodos, todėl tolesniam naudojimui, priklausomai nuo paskirties, gali skirtis ir panaudojimo galimybė. Tokios savybės kaip – drėgnumas, medienos rūšis, užterštumas derva, klijais ar kitomis medžiagomis – yra rodikliai ar šį produktą galima panaudoti kaip žaliavą. Yra daugybė pavyzdžių kur jos sėkmingai perdirbamos ir naudojamos – granuliu, briketų ar medienos plokščių (tokiose kaip OSB) gamyboje [26–28]. Kai kurios pjuvenos, ypač jei yra užterštos

cheminėmis medžiagomis (pvz., dažais, impregnantais ar klijais), netinka nei kaip kuras katilinėse, nei kaip žaliava perdirbimui dėl aplinkosauginių ir technologinių reikalavimų. Šiai dienai medžio pjuvenos yra taikomos ne tik statybų srityje, tinkamai apdorotos pjuvenos jau naudojamos tokiose srityse kaip: žemės ūkis, popieriaus gamyba, maisto pramonė ir biomasės energija.

Svarbu suprasti pjuvenų struktūrą, todėl išanalizuojamas žemiau pavaizduotas SEM vaizdas (2 pav.). Nuotrauka rodo netaisyklingos formos pjūvenų daleles su aiškiai matomais kanalais ir tolygiai išsidėsčiusiomis mikro poromis. Pjūvenų dalelių dydis siekia apie 500–600 μm , o paviršius pasižymi šiurkščia, laminuota struktūra, kuri gali pagerinti sąveiką su kompozitu [24].



2 pav. Medžio pjuvenų skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM) nuotrauka [24]

Prieš kompozitinės medžiagos formavimą, svarbu žinoti, kad sąveika tarp medienos konstrukcinių komponentų ir portlandcemenčio hidratacijos yra sudėtingas fizikinis ir cheminis ryšys [29]. Ankstesni tyrimų rezultatai [30] rodo, kad betonas su pjuvenų užpildu gali pasiekti tokį patį stiprumą kaip ir įprastas betonas per ilgesnį kietėjimo laikotarpį, priklausomai nuo rūšies, o vandenyje tirpūs ekstraktai sukelia ypač didelį sulėtėjimą dėl hidroksilo grupių sąveikos. Kad suprasti, kokios reakcijos tarp cemento ir medžio vyksta, pirmiausiai reikia išsiaiškinti medienos cheminę sudėtį.

Mediena yra organinė medžiaga, kurios sudėtyje yra polimerai – ligninas, celiuliozė ir hemiceliuliozė, taip pat įvairios hidroksilo grupės – taninai ar kiti fenoliniai junginiai [31].

Celiuliozė yra linijinė polimerinė grandinė. Vidiniai ir tarpmolekuliniai vandenilio ryšiai per laisvas hidroksilo grupes priverčia makromolekules tvarkingai (daugiausia lygiagrečiai viena kitai) arba netvarkingai orientuotis. Šis reiškinys skiriamas į: kristalinę celiuliozė ir amorfinę celiuliozė. Medienoje celiuliozės struktūra yra abiejų formų mišinys. Vietomis ji išsidėsčiusi pasikartojančiu raštu, kas suteikia tvirtumo ir stiprumo, o tarp kristalinio išsidėstymo, yra zonų kur celiuliozė netvarkinga. Amorfinės zonos suteikia medienai lankstumo ir sumažina atsparumą išorinėms jėgoms [32]. Tvarkinga struktūra sukuria hidroksilinius paviršius, kurie iš cemento porų sugeria kalcio jonus [33].

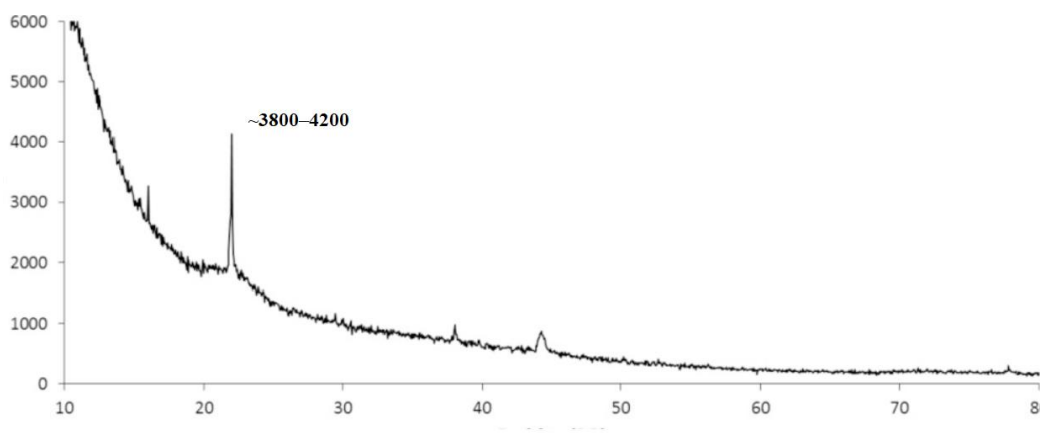
Hemiceliuliozė susideda iš polisacharidų. Hemiceliuliozė chemiškai skiriasi nuo celiuliozės tuo, kad ją sudaro skirtingi cukraus vienetai, polimerizacijos laipsnis yra mažesnis, pilnai amorfinė, labiau hidrofilinė ir jautri šarminei ir rūgštinei hidrolizei [34]. Taigi, hemiceliuliozė medienoje yra atsakinga už celiuliozės dalelių susijungimą, t. y. veikia kaip klijai. Mokslininkai Vaičekelionis ir Vaičekelionienė

atliko izoterminę kalorimetriją ir nustatė, kad pridėjus 2 % gliukozės, per 72 valandas šilumos išsiskyrimas sumažėja 35 %, vadinasi, cukrus slopina cemento hidrataciją [35].

Ligninas nuo kitų dviejų polimerinių medžiagų skiriasi tuo, kad jis apibūdinamas kaip stipriai išsišakojusi, amorfiška, erdvinė struktūra. Esant tinkamoms sąlygoms, drėgnas ligninas, įterptas į medieną, suminkštėja maždaug 100 °C temperatūroje ir leidžia jo molekulėms deformuotis. Kita vertus, medienai džiūnant, lignino minkštėjimas sumažėja, o hemiceliuliozės minkštėjimas vyksta būtent džiūnant [36]. Tačiau hemiceliuliozės brinkimas nėra toks kenksmingas kaip lignino. Aukštoje temperatūroje apdirbtos pjuvenos sumažina brinkimo deformacijas, kurios sukelia geometrinius pokyčius [37]. O būtent geometriniai pokyčiai ir lemia prastą kontakto zoną tarp medžio ir cemento.

Lignoceliuliozės pluoštų (taip vadinama celiuliozė, hemiceliuliozė ir ligninas bendrai) celiuliozės grandinių laisvos hidroksilo grupės pritraukia vandens molekules drėgnoje aplinkoje, todėl pluoštai išsipučia. Tokiu atveju, dėl hidrolizės ir oksidacijos, celiuliozės grandinės praranda vientisumą. Šiuos procesus skatina biogeninių fermentų veikimas arba cheminiai veiksniai, tokie kaip rūgštingumas, šarmingumas, druskingumas arba UV spinduliuotė [38]. Kitaip tariant, mediena turi daleles, kurios pritraukia drėgmę, kai yra drėgnoje aplinkoje, o tai gali daryti neigiamą įtaką: per tam tikrą laiką mediena susilpnėja – taip nutinka dėl natūralių priešasčių.

Pjuvenų mėginio kristalografiją ištyrė mokslininkai Ahmed ir kt., atliko rentgeno difrakciją (XRD), kuri parodyta 3 pav., horizontalioje ašyje nurodoma pozicija (2θ – skenuojamas kampas laipsniais), vertikalioje – intensyvumas (kartai per sekundę) [24]. Iš šio spektro matome, kad yra du aiškūs paaukštėjimai. Ties 22° paaukštėjimu, indikuojama sinchronizuota kristalinė celiuliozė, o ties 16° indikuojama mažiau sinchronizuotą polisacharidą [31].



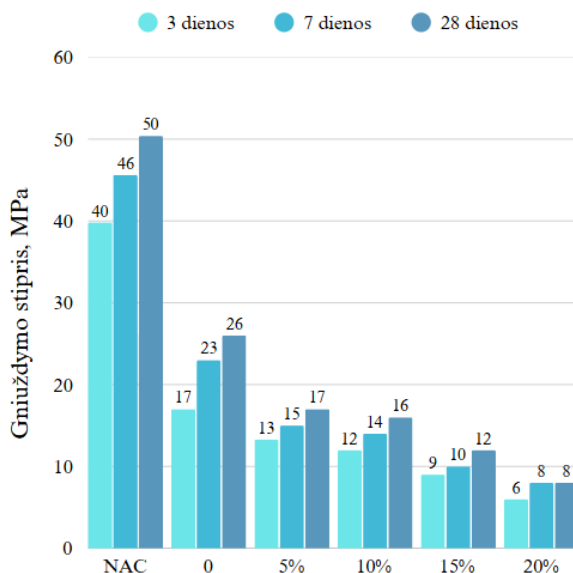
3 pav. Medžio pjuvenų XRD spektrograma [24]

1.3. Medžio pjuvenų įtaka biokompozito pagrindinėms savybėms

1.3.1. Gniuždomasis ir lenkiamasis stipris

Atsižvelgiant į skirtingų mokslininkų tyrimus, galima pastebėti, kad didelis trūkumas šių biokompozitų yra gniuždomasis ir lenkiamasis stipris. Pavyzdžiui Wang ir kt. [39] atliko tyrimą, kuriame naudojo medžio drožles ir kintantį kiekį medžio pjuvenų (gniuždomojo stiprio rezultatai pateikti 4 pav.). Nustatė, kad pridėdant medienos užpildo gniuždymo ir lenkimo stipris sumažėjo – smulkaus užpildo pakeitimas medienos pjuvenomis perdirbtame ekologiškame betone sumažino tankį ir pagerino šilumos laidumą, o lenkimo stipris buvo ~5 MPa. Visi gauti rezultatai suprastėjo dėl

vienos ar daugiau priežasčių: dėl blogai pasirinkto mineralinių užpildų pakeitimo santykio, prasto užpildo apdorojimo ir cemento matricos jungties. Awal ir kt. taip pat pastebėjo, kad didinant užpildo kiekį mišinyje, gniuždomasis ir lenkiamasis stipris mažėja, naudojant cemento ir medžio pjuvenų santykį 1:3, gautas gniuždomasis ir lenkiamasis stipris po 28 dienų kietėjant – atitinkamai 12,80 MPa ir 1,30 MPa [40]. Kai tuo tarpu naudojant cemento ir medienos pjuvenų santykį 1:1 gautas gniuždomasis ir lenkiamasis stipris atitinkamai 18,65 MPa ir 2,05 MPa.



4 pav. Medžio pjuvenų įtaka sukietėjusio betono gniuždomajam stipriui [39]

Norint sukurti efektyvias pjuvenų ir betono kompozitines užpildo granules, reikia atkreipti dėmesį į keletą veiksnių – sudėties santykis, apdorojimo metodas ir priedai. Mokslininkai nustatė, kad didėjant pjuvenų kiekiui, mažėja gniuždomasis stipris, todėl remiantis turimais tyrimais, optimalioje preliminarinioje sudėtyje turėtų būti naudojamas maždaug 2:1 cemento ir medienos santykis, o pjuvenos būtų apdorotos. Kalcio formiato ar kalcio nitrato pridėjimas (0,1–2 % cemento masės) gali žymiai pagerinti kietėjimo savybes ir ankstyvą stiprumo vystymąsi [41].

1.3.2. Šiluminis laidumas

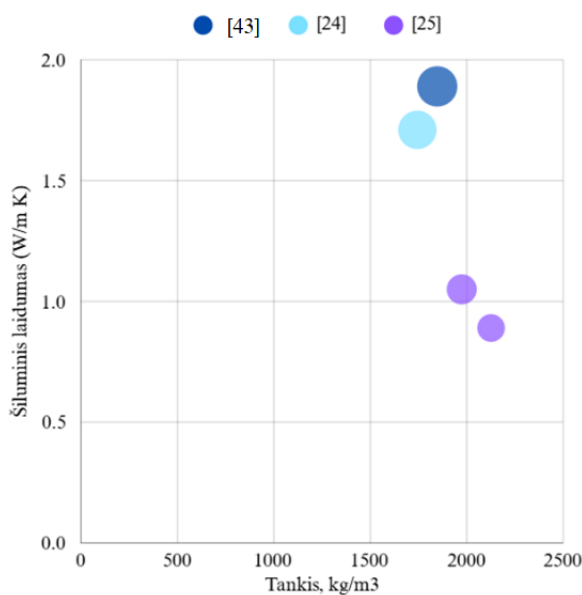
Pakeitus smėlį medžio pjuvenomis, sumažėja ne tik anglies dioksido emisijos bet ir šilumos laidumas. Tai yra itin aktualu šaltojo klimato zonoms, nes energetiškai efektyvius pastatus yra dar sunkiau pasiekti, dėl jų konstrukcijų šilumos laidumo. Šilumos nuostoliai reikalauja didesnių šildymo sąnaudų, todėl padidėja energijos sunaudojimas. Intensyvaus energijos naudojimo poveikis aplinkai didina su klimato kaita susijusius iššūkius [25]. Pedreño-Rojas ir kt. atliktas tyrimas [42] nustatė, kad naudojant pjuvenas pakabinamų lubų plokštes gamybai vietoj tradicinio tinko sumažėjo šilumos laidumas. Pasak Ahmed ir kt. [24], smėlio pakeitimas džiovinomis pjuvenomis gali padėti sumažinti tradicinio ir lengvojo betono šilumos laidumą. Taip pat, Sales ir kt. [43] tyrė betono ir pjuvenų kompozitų šilumines savybes ir nustatė, kad šilumos laidumo rezultatai sumažėjo 23,2 % lyginant su kontroliniu bandiniu. Padaryta išvada, kad šiam sumažėjimui įtakos turėjo kompozito mažas tankis ir didelis poringumas. Šių mokslininkų gauti rezultatai skiriasi, nes visur naudojama skirtinga mišinio sudėtis, rezultatai pateikti 1 lentelėje ir 5 paveikslėlyje.

1 lentelė. Šiluminio laidumo ir tankio reikšmės su skirtingomis mišinio sudėtimis

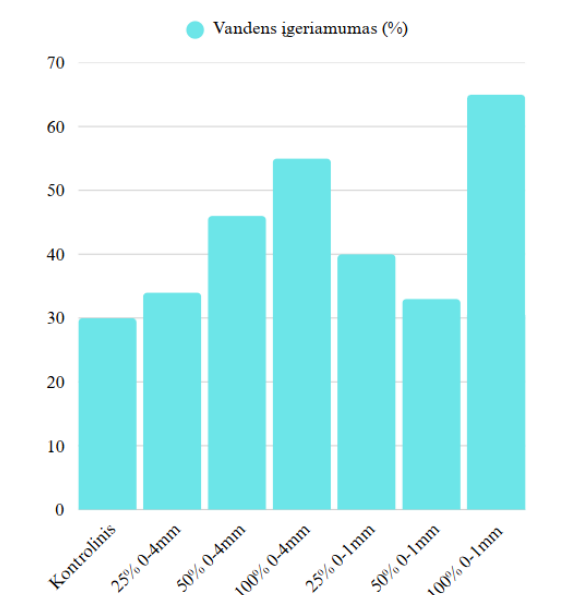
Šaltinis	Šiluminis laidumas (W/m K)	Tankis, kg/m ³	Pastabos
[43]	1,89	1847	Pjuvenų, nuotekų dumblo, vandens santykis (kg) 1:6:4,5
[24]	1,71	1743,96	Cemento ir vandens santykis 1:0,5, 10 % pjuvenų
[25]	1,05	1974	1:9 pjuvenų ir smėlio santykis, akmenys, 1:9 pelenų ir cemento santykis
[25]	0,89	2126	4:6 pjuvenų ir smėlio santykis, akmenys, 1:9 pelenų ir cemento santykis

1.3.3. Vandens įgeriamumas

Atsižvelgiant į skirtingų mokslininkų atliktų tyrimų rezultatus, nustatyta, kad betono vandens įgeriamumas didėja didinant medžio pjuvenų tūrį. Pjuvenų dalelės yra porėtos, tad efektyviai sugeria vandenį, vandens kiekis turi būti numatytas atsižvelgiant į tai. Awal ir kt. naudojo cemento ir medžio pjuvenų santykį 1:3, gautas vandens įgeriamumas 19 %, o kai santykis 1:1 – 13 % [40]. Mokslininkai Özkan ir kt. [44] naudojo skirtingo dydžio pjuvenas (0–1 mm ir 0–4 mm) ir smėlio skirtingą kiekį keitė pjuvenomis – 0, 25, 50 ir 100 %, vandens įgeriamumą nustatė kintantį nuo 32 % iki 65 %. Bandinių vandens ir cemento santykis 1:0,6, rezultatai pateikti grafiškai 6 pav.



5 pav. Šiluminio laidumo ir tankio reikšmės



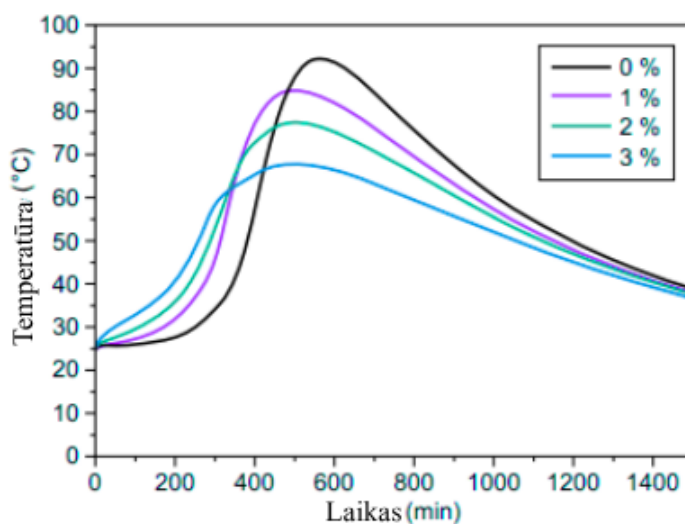
6 pav. Vandens įgeriamumo (%) grafikas

1.4. Medžio pjuvenų paruošimo būdai

Arbolitas (medžio betonas) – lengvasis konstrukcinis ir šilumą izoliuojantis betonas, kuris susideda iš cemento, medienos drožlių (iki 80–90 % tūrio) ir cheminių priedų [45]. Tinkamas pjuvenų apdorojimas užtikrina suderinamumą su cementu. Medienos hidrofiliniai junginiai, atsižvelgiant į mokslininkų tyrimus, kelią iššūkių, norint pasiekti patvarų biokompozitą. Kompozito matricos sąveikai pagerinti reikia neutralizuoti cukrų (pvz. hidrolizuojamus taninus) [46]. Taninai – junginiai išsiskiriantys iš medžio, kurie lėtina cemento kietėjimo procesą. Cheminis apdorojimas yra universalus apdorojimo būdas, siekiant pagerinti pjuvenų savybes, nes tai atveria galimybę pritaikyti medžiagą specifiniams poreikiams [47]. Skirtingai nuo fizinio apdorojimo, kurį gali riboti natūralios pjuvenų savybės, cheminis apdorojimas leidžia žymiai pagerinti stiprumą, ilgaamžiškumą ir atsparumą išoriniams veiksniams [48].

1.4.1. Kalcio nitrato įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui su medžio pjuvenomis

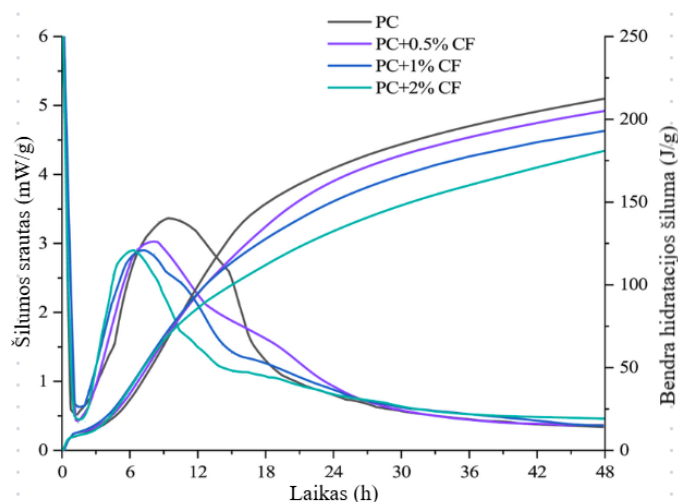
Hidrolizės metu iš pjuvenų išsiskiriantis cukrus gali sulėtinti cemento hidrataciją. Lėtikliai sulėtina stingimo procesą, trukdydami kalcio silikato hidratų kristalizacijai. Tačiau tyrimai rodo, kad priedai, tokie kaip kalcio nitratas ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) skatina hidrataciją, nepaisant to, kad yra lėtinančių medžiagų. Mokslininkų Kičaitė ir kt. [49] rezultatai rodo, kad $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ priedas sutrumpina cemento pastos hidratacijos indukcijos periodą ir sumažina maksimalią cemento pastos hidratacijos temperatūrą. Jis pagreitina cemento hidrataciją padidindamas jonų koncentraciją mišinyje, o tai kompensuoja lėtinančių cukrų ar taninų poveikį. Šiuose eksperimentiniuose tyrimuose taip pat nustatyta, kad net nedideli kiekiai (0,5–1 %) kalcio nitrato pagerina ankstyvą konstrukcijos rišimąsi, stiprumas žymiai padidėja, iš to galima daryti išvada, kad į mišinį, kuriame yra medžio pjuvenų, įtraukus kalcio nitrato – pagerinamos ankstyvosios mechaninės savybės, tai iš dalies kompensuotų medžio pjuvenų neigiamą poveikį. Iš 7 pav. pavaizduotų gautų rezultatų galima grafiškai matyti, kad temperatūros pikas yra vis žemesnis ir yra pasiekiamas greičiau, naudojant vis didesnę kiekį kalcio nitrato.



7 pav. Kalcio nitrato įtaka portlandcemenčio hidratacijos proceso metu išsiskiriančiai temperatūrai [49]

1.4.2. Kalcio formiato įtaka portlandcemenčio hidratacijos procesui

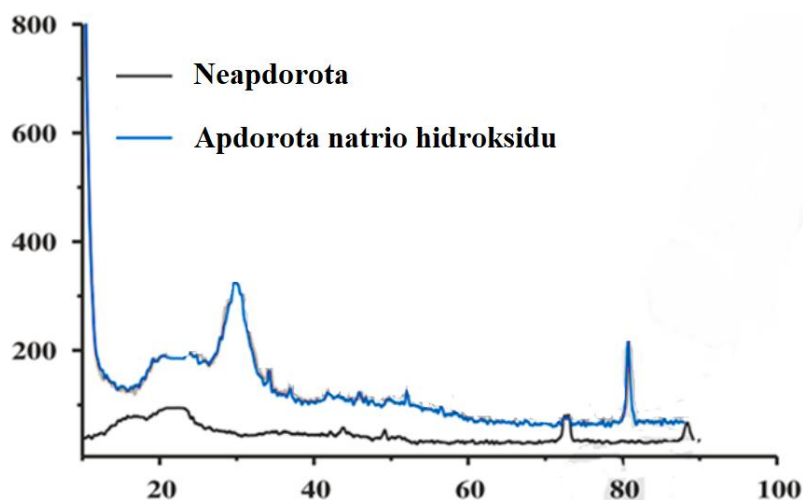
Kitas veiksmingas cheminis neutralizavimo būdas medžio pjuvenoms – kalcio formiatas ($\text{Ca}(\text{HCOO})_2$). Kalcio formiatas neutralizuoja taninus ir skatina hidrataciją, nepaisant lėtinančių medžiagų. Buvo nustatyta, kad kalcio formiato ir nitrato pridėjimas į bakterijų sporų miltelius pagreitino betono hidratacijos procesą [41]. Tad galime daryti prielaidą, kad šis cheminis apdorojimas galėtų būti veiksmingas pjuvenų ir cemento kompozitui. Grafike (8 pav.) rodomas šilumos srautas per laiką (kairėje ašyje) ir bendra hidratacijos šiluma (dešinėje ašyje) skirtingiems cemento mišiniams su skirtingomis kalcio formiato koncentracijomis. Matyti, kad kalcio formiatas veikia hidratacijos kinetiką: didesnės kalcio formiato koncentracijos sumažina pirminio šilumos srauto piką, bet gali šiek tiek padidinti ankstyvąjį bendrą šilumos kaupimą. Apibendrinus, kalcio formiatas keičia cemento hidratacijos tempą, lėtindamas pirminį greitą egzoterminį etapą, bet palaipsniui prisideda prie šilumos išsiskyrimo. [50]



8 pav. Kalcio formato (CF) poveikis portlandcemento (PC) hidratacijai [50]

1.4.3. Kiti cheminiai priedai

Norint pagerinti cemento hidrataciją, galima pridėti įvairių greitiklių, ne tik kalcio nitrato ar kalcio formiato. Mokslininkai Rahman ir Khondoker [51] išanalizavo kelis pjuvenų apdorojimo būdus ir patvirtino, kad natrio hidroksidas (NaOH), natrio metasilikatas (Na_2SiO_3) ir kalcio hidroksidas ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pagerina gniuždymo stiprumą ir ilgaamžiškumą, lyginant su neapdorotomis pjuvenomis. Taip pat priėjo išvadą, kad $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kartu su laku yra veiksmingiausi bandant suvaldyti vandens įgeriamumą. Tačiau šiuo apdorojimo metodu pasiekiamas mažesnis mechaninis stiprumas, dėl prastos kontakto zonos. Morfologiniai tyrimai atskleidė, kad cheminis apdorojimas sumažina tuštumas, paviršiaus šiurkštumą ir pluošto atsitraukimą, lyginant su neapdorotomis pjuvenomis. NaOH parinko kaip geriausią apdorojimo būdą, nes parinkus tinkamą kiekį, jis pašalina teršalus ir pagerina pjuvenų ir cemento matricą. 9 paveikslėlyje pavaziduota apdorotų ir neapdorotų pjuvenų rentgeno difraktograma, vertikalia kryptimi nurodomas intensyvumas, horizontaliai – 2θ kampas laipsniais. Visi mėginiai paaukštėja, tai parodo celiuliozę, taip pat matoma, kad NaOH naudojimas gali sumažinti amorfinės hemiceliuliozės ir lignino kiekį [48]. Iš šios apžvalgos galima spręsti, kad reikalingas hibridinio cheminio apdorojimo optimizavimas.



9 pav. Neapdorotų ir natrio hidroksidu apdorotų pjuvenų kristalinės struktūros XRD spektras [48]

1.5. Skalūniniai pelenai

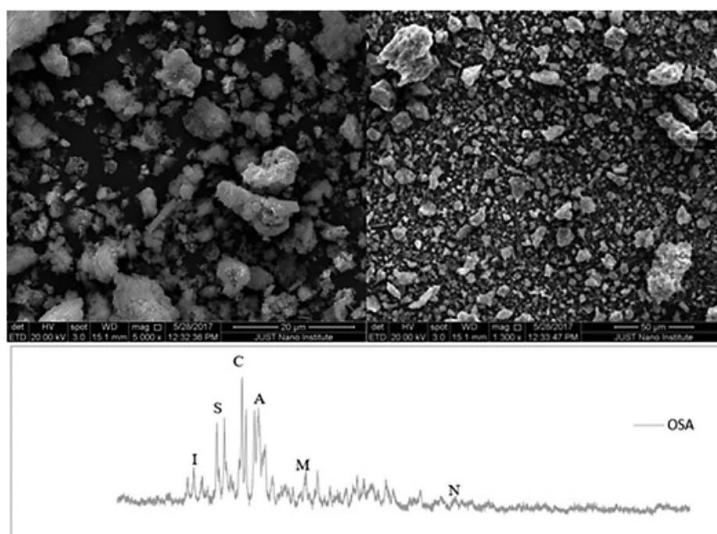
Skalūniniai pelenai yra deginta uoliena, kur susiformuoja iš organinių ir mineralinių nuosėdų. Šią medžiagą tinkamai apdorojus galime laikyti pucolanine medžiaga, nes jos sudėtis yra kompleksinė [52]. Šie pelenai yra atlieka, kuri susidaro šiluminės energijos gamybos metu, tad jų naudojimas padeda išspręsti utilizavimo problemą [53]. Taip pat, ši medžiaga aktuali norint sumažinti betono CO₂, nes jos naudojimas gali pakeisti klinkerį, o tai yra viena iš pagrindinių cemento sudedamųjų dalių [54]. Šiai dienai skalūniniai pelenai yra klasifikuojami kaip atlieka, kurią reikia perdirbti (pagal ES), tad panaudojimas betone prisidėtų prie šių direktyvų [53].

Skalūninių pelenų cheminėje sudėtyje (žr. 2 lentelėje) didžiąją dalį užima trys oksidai – SiO₂, Fe₂O₃ ir Al₂O₃. Tai labai svarbu, nes šie trys oksidai lemia pucolaniškumą, kadangi jų kiekis kartus sudėjęs viršija 70 %, vadinasi, medžiaga reaguoja su Ca(OH)₂ [55].

2 lentelė. Skalūninių pelenų cheminė sudėtis [56]

Cheminis junginys	Kiekis, %
SiO ₂	57,83
Fe ₂ O ₃	11,42
Al ₂ O ₃	19,25
CaO	3,26
SO ₃	0,50
MgO	1,39
K ₂ O	1,32
Na ₂ O	0,93

Skalūninių pelenų dalelės savitasis tankis yra 2,69 g/cm³ [57]. 10 paveikslėlyje pavaizduota mikrografija iš SEM nuotraukos ir mineralogijos analizė iš XRD (OSA – skalūniniai pelenai). Matomos įvairios formos – amorfinės ir geometrinės, pvz. kampinė, tetrakampė, penkiakampė ir šešiakampė su šiurkščiais ir porėtais paviršiais [57].



10 pav. Skalūninių pelenų SEM mikrofografija ir XRD analizė. C: kalcio oksidas, S: silicio oksidas, A: aliuminio oksidas, I: ferito oksidas, M: magnio oksidas, N: natrio oksidas [57].

Mokslininkai iš Jordanijos [52] atliko tyrimus su skalūniniais pelenais, jų naudojimą betone, ir nustatė, kad optimaliausias dalinio cemento pakeitimo kiekis yra iki 30 %. Naudojant šį santykį, lenkiamasis stipris padidėja iki 50 %, tačiau tempiamasis ir gniuždomasis stipriai sumažėja – atitinkamai 44 % ir 33 %. Taip pat, su šia sudėtimi buvo nustatyta, kad gaunami mažiausi nuostoliai, tirinat atsparumą aukštai temperatūrai. Mokslininkai Ashteyat ir kt. [58] naudojo 0,4 santykį vandeniui ir greitikliui, ir didino pelenų kiekį 10 %, 20 %, 30 %, 40 %. Nustatyta, kad didėjant pelenų kiekiui – mažėja gniuždomasis stipris, tai siejama su kalcio oksido CaO trūkumu sudėtyje.

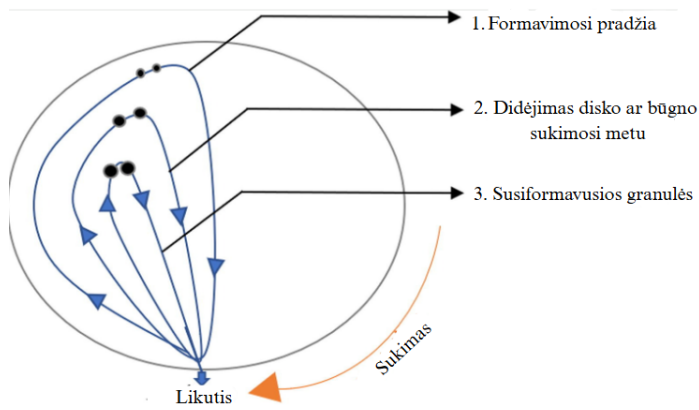
1.6. Dirbtinio užpildo gamybos technologija

Dirbtiniai užpildai ir jų gamyba iš įvairių pramoninių atliekų yra efektyvus būdas įtraukti atliekas į betoną. Vienas iš būdų kurti lengvąjį dirbtinį užpildą – granuliavimas. Tai sprendžia į atliekų kaupimosi ir natūralaus akmens trūkumo problemas, nes pramoninės, miesto ar žemės ūkio atliekos paverčiamos žaliavomis statybinėms medžiagoms [59]. Granuliavimas – smulkių dalelių aglomeracija diskiniame arba būgniniame granuliatoriuje, taip suformuojant granules be išorinio slėgio [60]. Šio metodo veikimo principas grindžiamas centrifuginėmis ir gravitacinėmis jėgomis [61]. Taip pat, šiam metodui nėra reikalingas šildymas, todėl jį galime laikyti kaip energiją taupančiu sprendimu [61]. Gaminant užpildą granuliavimo būdu taikoma aglomeracija naudojant sukimo ir kapiliarines jėgas, vadinasi, prieš kietėjimo procesą granulės jau yra suformuotos į reikiamą formą, smulkios medžiagos prijungiamos į granulę dar prieš kietėjimą, jų forma nebesikeičia [60]. Granuliavimą sudaro skirtingi etapai – pirmiausiai susidaro skysčio plėvelė tarp dalelių kontaktinėse vietose, tada formuojasi tvirtesnis ryšys tarp dalelių, galiausiai oras pasišalina ir poras užpildo skystis – ryšys toliau didėja [60]. Granulių susidarymo kelio schemą žiūrėti 11 paveikslėlyje.

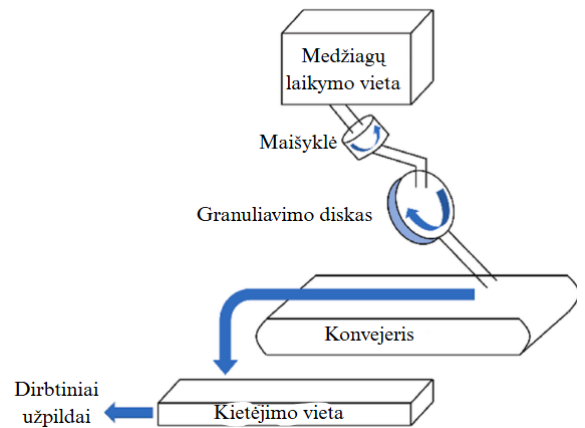
Lengvųjų dirbtinių užpildų granuliavimo pasisekimas priklauso nuo tinkamo technologinio proceso parametrų valdymo. Netinkamas procesų nustatymų parinkimas skatina defektų atsiradimą, pvz. per dideli ir susikaupę granulių kamuoliai [59]. Tyrimai rodo, kad svarbu tinkamai parinkti nuolydžio kampą ir sukimosi greitį, nes esant per mažam nuolydžio kampui ir per žemam sukimosi greičiui sumažėja judėjimo kelias granulėms ir tarpusavio susidūrimo dažnis per mažas [59]. Tuo tarpu per didelis nuolydis arba per didelis greitis skatina per didelių ir netolygių granulių formavimąsi [59]. Nustatyta, kad dažnu atveju, tinkamiausias sukimosi greitis – 45 rpm, o pasvirimo kampas – 45° [61]. Kitas kritinis parametras – vandens kiekis. Jo turi būti tiek, kad užtektų užpildyti tarpelius tarp dalelių ir pašalinti susikaupusį orą. Jei jo yra per daug, tai gali lemti nestabilių, purvinių kamuolių susidarymą, ypač jei užpildai jautrūs drėgmei [59]. Šiai dienai jau yra numatytas pramoninis potencialas granuliavimo metodui, schemą žiūrėti 12 paveikslėlyje.

Mokslininkų atliktas tyrimas [59] parodė, kad esant toms pačioms šarminėms sąlygoms, granuliavimo rezultatai priklauso nuo žaliavos tipo ir proceso trukmės. Taip pat, pastebėta, kad šiuo metodu pavyko sunaudoti 80 % visos žaliavų masės granulių sudarymui (efektyvumo skaičiavimui, granulės <5 mm nebuvo įtrauktos, vadinasi, tikrasis granuliavimo efektyvumas dar didesnis) [59].

Lengvieji dirbtiniai užpildai (LDU) tampa vis reikšmingesniu sprendimu, dėl savo ekonominių ir ekologinių naudų. Jų gamybos ir taikymo procese galima efektyviai panaudoti įvairias atliekas bei antrines žaliavas, kurios priešingu atveju kelia grėsmę aplinkai. Tokiu būdu yra optimizuojami ištekliai, sprendžiama atliekų tvarkymo problema ir mažinamos sąnaudos.



11 pav. Kelias iki granulių susidarymo [60]



12 pav. Granuliavimo metodo praktinis pritaikymas pramonėje [59]

1.7. Literatūros analizės išvados

Daugybė tyrimų atlikta naudojant įvairių formų medienos biokompozitus, tačiau vis dar reikalingas jų naudojimo betono mišiniuose optimizavimas. Pirmiausia, svarbu atrasti tinkamas priemones medienos neutralizavimui, kad užtikrinti sukibtį su cementu. Šiam reikalui užtikrinti mokslininkai naudoja skirtingus cheminius priedus. Pastebėta, kad sėkmingų tyrimų su granuliavimo metodu gautais lengvaisiais užpildais nėra, todėl pasirinkta naudoti šį dirbtinių užpildų gamybos metodą. Taip pat, iš literatūroje esamų tyrimų, nuspręsta, kad optimaliausią 50 % smėlio pakeisti granuliuotų užpildu. Siekiant sumažinti cemento kiekį, galima panaudoti skalūninius pelenus užpilduose.

Reikia atlikti tyrimus, kurie nustatytų medžio pjuvenų įtaką portlandcemenčio hidratacijos procesams. Remiantis gautais rezultatais suformuoti dirbtinį užpildą pagal numatytą technologiją ir nustatyti jo savybes. Galiausiai, ištirti biokompozito, suformuoto su lengvaisiais dirbtiniais užpildais, fizikines ir mechanines savybes. Taip pat palyginti su rinkoje esančiais gamintojų užpildais – keramzito užpildu ir granuliuotu putstikliu.

2. Tyrimų metodologija

2.1. Naudotos medžiagos

Šiame skyriuje aprašomos eksperimentiniuose bandiniuose naudotos medžiagos:

- cementas;
- medžio pjuvenos;
- smėlis;
- skalūniniai pelenai;
- vanduo;
- superplastiklis;
- cheminiai priedai: kalcio nitratas ir kalcio formiatas;
- keramzito užpildas;
- granuliuotas putstiklis.

2.1.1. Cementas

Kompozito rišamoji medžiaga, naudota tyrime – cementas CEM II 42,5 N. Pasirinkta naudoti šį cementą, nes atitinka LST EN 197-1 standartą ir CEM II gamyboje išskiriama 30 % mažiau CO₂ nei CEM I. Mechaninės, fizikinės ir cheminės savybės pateiktos 3 lentelėje. Šio cemento gamybai naudojamos žaliavos:

- kalkakmenis;
- smėlis;
- molis;
- geležies rūda;
- gipsas / anhidritas;
- aukštakrosnių šlakas;
- nedidelės papildomos sudedamosios dalys.

3 lentelė. Cemento CEM II mechaninės, fizikinės ir cheminės savybės

Esminės charakteristikos	Deklaruojama reikšmė
Stipris gniuždant, MPa: po 2 parų; po 28 parų	24 ± 3; 52 ± 3;
Rišimosi pradžia, min	180
Tūrio pastovumas, mm	1
Vandens sąnaudos, %	32
Liekana ant st. 90 µm sieto, %	-
Liekana ant st. 45 µm sieto, %	2,7
Savitasis paviršius, (cm ² /g)	6500
Sulfatų SO ₃ kiekis, %	3,3
Chloridai (Cl ⁻), %	0,06
Šarmų kiekis, Na ₂ O, %	< 0,8

2.1.2. Skalūniniai pelenai

Siekiant sumažinti cemento naudojimą eksperimente, dirbtinių užpildų gamybai įtraukti skalūninių pelenai. Naudoti pelenai yra iš naftos skalūninių šiluminės elektrinės, kurios vietovė Estijoje, savybės pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. Naudotų skalūninių pelenų cheminė sudėtis

Cheminė formulė	SiO ₂	CaO	CaO _{free}	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Kiekis, %	27,7	36,7	9,99	4,28	4,20	7,01	10,4	4,25	0,088

2.1.3. Vanduo

Lengviesiems dirbtiniams užpildams ir betono mišiniui pagaminti naudotas geriamasis vanduo iš Kauno miesto vandentiekio. Vandens kokybė labai svarbi betono mišiniui – jame neturi būti priemaišų, kurios galėtų pakenkti cementui (pvz., aliejų, organinių medžiagų ar kt.).

2.1.4. Medžio pjuvenos

Užpildų gamybai buvo naudojamos paprastosios pušies (*Pinus sylvestris*) medžio pjuvenos, kurių piltinis tankis yra 200 kg/m³. Šių medžio pjuvenų dalelių ilgis svyruoja nuo 3 iki 6 mm, o plotis apie 1–1,5 mm (žr. 13 pav.).



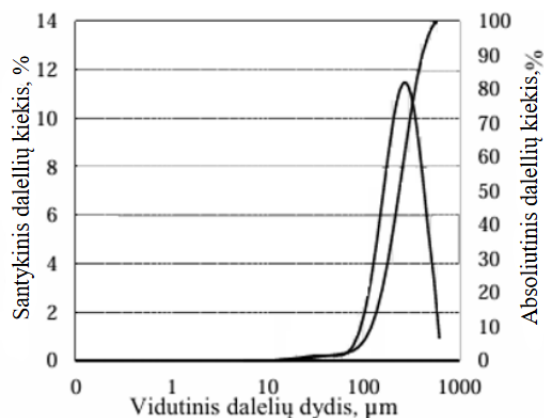
13 pav. Naudotos medžio pjuvenos

2.1.5. Cheminiai priedai

Dirbtiniams užpildams naudoti papildomi cheminiai priedai – kalcio nitratas Ca(NO₃)₂ (skysta forma) ir kalcio formiatas Ca(HCOO)₂ (miltelių forma). Tikslas naudojant juos neutralizuoti cukrų medžio pjuvenose ir pagerinti betono savybes.

2.1.6. Smėlis

Smėlis vienas dažniausiai pasitaikančių smulkių užpildų, kurie naudojami betono gamyboje. Smėlis turi būti neužterštas ir neturėti jokių organinių medžiagų. Eksperimentuose, gaminant skiedinį bandiniams, dalis smėlio keičiama dirbtiniu užpildu, dalis paliekama. Naudoto smėlio didžiausias dalelių dydis neviršija 2 mm (0/2 mm frakcija), granulometriją žr. 14 pav.



14 pav. Smėlio integralinis ir diferencialinis pasiskirstymas pagal dalelių dydį

2.1.7. Superplastiklis

Siekiant gauti stipresnį betoną, įtraukiamas aukšto efektyvumo superplastiklis. Naudojant šį priedą sumažinamas vandens kiekis, padidinamas tankis ir stiprumas. Gamintojo nurodyti techniniai duomenys bandymuose naudotam superplastikliui pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Superplastiklio techniniai duomenys

Esminės charakteristikos	Deklaruojama reikšmė
Pagrindinė cheminė sudedamoji dalis	Modifikuotų polimerų vandeningas tirpalas
Išvaizda	Rusvas skystis
Tankis (esant +20 °C temperatūrai)	1080 kg/m ³
Ekvivalentinio natrio oksido kiekis, %	≤ 0,4
Suminis chloridų jonų kiekis, %	≤ 0,2

2.1.8. Keramzito užpildas

Gamintojo nurodyti techniniai duomenys bandymuose naudotam užpildui (15 pav.) pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Keramzito granuliuotų techniniai duomenys

Esminės charakteristikos	Deklaruojama reikšmė
Gaisro klasifikacija – reakcija į ugnį	A1
Grūdėtumas	0–5 mm
Laisvas tūrinis tankis	425–575 kg/m ³
Šilumos laidumo koeficientas λ	0,12 W/mK
Sutankinimo laipsnis	10 %

2.1.9. Granuliuotas putstiklis

Gamintojo nurodyti techniniai duomenys bandymuose naudotam užpildui (16 pav.) pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Putstiklio granulių techniniai duomenys

Esminės charakteristikos	Deklaruojama reikšmė
Granulių dydis	1–2 mm
Piltinis tankis kg/m ³ (±15 %)	230
Dalelių tankis Mg/m ³	0,37
Atsparumas gniuždymui MPa (±0,5 MPa)	2,0
Šilumos laidumo koeficientas W/(m*K)	0,0663
Vandens įgeriamumas % nuo masės* (±15 %)	nuo 15,3 iki 20,7
Atsparumas šaldymui ir šildymui % nuo masės **	4
pH vertė	9–11
Lydymosi temperatūra	~700 °C

**15 pav.** Naudotos keramzito granulės**16 pav.** Naudotos pusto stiklo granulės**2.2. Tyrimo metodai****2.2.1. Pusiau adiabatinis kalorimetro tyrimas**

Šio tyrimo metu nustatomas išskiriamas šilumos kiekis cemento hidratacijos proceso metu. Tikslas – nustatyti skalūninių pelenų, medžio pjuvenų ir cheminių priedų įtaką cementinės teslos hidratacijai. Paruošiamos penkios skirtingos sudėtys, sumaišomos į teslą ir dedama į 30 ml indelį, kuris nedelsiant dedamas į kalorimetrą. Procesas fiksuojamas 2–4 dienas, kietėjimo sąlygos: 20 ± 2 °C (temperatūra) ir 50 ± 5 % (santykinė drėgmė), kietinama ore, nepraleidžiant jokių šviesos spindulių. Tyrimas atliktas vadovaujantis LST EN 196-9:2010 standartu.

Hidratacijos metu išsiskirianti temperatūra matuojama keturioms skirtingoms sudėtims:

- cementas ir skalūniniai pelenai (bandinių skaičius: 5 vnt.);
- cementas, skalūniniai pelenai ir medžio pjuvenos (bandinių skaičius: 4 vnt.);
- cementas, skalūniniai pelenai, medžio pjuvenos, kalcio nitrato tirpalas (bandinių skaičius: 5 vnt.);
- cementas, skalūniniai pelenai, medžio pjuvenos ir kalcio formiato tirpale (bandinių skaičius: 5 vnt.).

2.2.2. Skalumo bandymas

Skalumo bandymas atliekamas pagal LST 1476.7 standartą. Dirbtinių užpildų stiprumas vertintas po 28 parų kietinimo ore, kietėjimo sąlygos: 20 ± 2 °C (temperatūra) ir 50 ± 5 % (santykinė drėgmė). Bandymo metu užpildai buvo sudėti į cilindą, siekiant, kad viršutinis paviršius būtų lygus su cilindro kraštu. Paruoštas cilindras su užpildais buvo patalpintas po hidrauliniu presu, o bandymo metu užfiksuota ardomoji jėga, ties kuria stūmoklis pasiekė 2 cm deformaciją.

2.2.3. Skiedinių bandinių formavimas

Bandymams atlikti pasirinkta 4x4x16 cm dydžio formelės. Siekiant palyginti užpildų įtaką kuo tiksliau, skiedinio sudėtis išlaikoma vienoda, kinta tik užpildas. Bandiniuose su dirbtiniais užpildais keičiama puse smėlio tūrio, lyginant su kontroliniu bandiniu.

Pirmiausia homogeniškai sumaišomos sausosios medžiagos – cementas, skalūniniai pelenai, smėlis ir (jei reikia) dirbtinis užpildas, maišoma 60 sekundžių. Padaroma 60 sekundžių pauzė. Sekančiai supilamas vanduo su superplastikliu ir maišoma dar 120 sekundžių. Galiausiai supilama į formas ir paliekama kietėti. Po 28 parų kietėjimo ore bandinius galima naudoti bandymuose. Kietėjimo sąlygos: 20 ± 2 °C (temperatūra) ir 50 ± 5 % (santykinė drėgmė).

2.2.4. Lenkiamasis stipris

Bandymas atliekamas po 28 parų kietėjimo ore pagal LST EN 12390-5 standartą. Kietėjimo sąlygos: 20 ± 2 °C (temperatūra) ir 50 ± 5 % (santykinė drėgmė). Siekiant užtikrinti rezultatų patikimumą, bandymas atliekamas du kart ir išvedamas vidurkis iš dviejų gautų rezultatų. Šiam bandymui naudojamos 4x4x16 cm prizmės. Bandiniai apkraunami centrine apkrova, tarp atramų 10 cm.

2.2.5. Gniuždomasis stipris

Bandymas atliekamas po 28 parų kietėjimo ore pagal LST EN 12390-7 standartą. Kietėjimo sąlygos: 20 ± 2 °C (temperatūra) ir 50 ± 5 % (santykinė drėgmė). Gniuždymui naudojamas hidraulinis presas. Siekiant užtikrinti rezultatų patikimumą, bandymas atliekamas keturis kart ir išvedamas vidurkis iš visų gautų rezultatų. Šiam bandymui naudojami perlenkti atskiri bandiniai iš lenkimo bandymo, kurie prieš dedant į presą yra nušlifuojami.

2.2.6. Susitraukimo deformacijos

Bandymas atliekamas pagal LST EN 12390-16:2019 standartą. Šiam bandymui naudojamos laboratorijoje laikomos 4x4x16 cm prizmės su įtvirtintais plieniniais antgaliais. Laikymo temperatūra apie 20 ± 2 °C, oro drėgmė apie 50 ± 5 %. Bandymo metu tris dienas matuojama kasdien, sekančiai mėnesį matuojama kas savaitę, o vėliau kas mėnesį. Bandymui atlikti reikalingas prietaisas pateiktas 17 pav.

Šių matavimų tikslas – gavus rezultatus įvertinti, kiek betonas traukiasi ir kaip tai gali paveikti konstrukcijos ilgaamžiškumą bei eksploatacines savybes, kadangi tūrio pokyčiai kietėjimo metu, gali sukelti plyšius ar konstrukcijos deformacijas.



17 pav. Susitraukimų matavimo bandymo prietaisas

2.2.7. Poringumo ir vandens įgeriamumo nustatymas

Bandymas atliekamas po 28 parų kietėjimo ore pagal nurodytą mokslinę publikaciją [62]. Bandinių laikymo temperatūra apie 20 ± 2 °C, oro drėgmė apie 50 ± 5 %. Pirmiausiai bandiniai įdedami į krosnelę, kad išdžiūtų laikomos ten 24h. Pasvėrus bandinius, įdedame juos į vandens talpą ir atliekamas pirmasis masės matavimas po 15 min, o sekantys po 1h, 24h ir 48h. Atliekant matavimus po 48h, bandiniai pasveriami taip pat ir vandenyje.

Po masės matavimų, reikalinga atlikti poringumo ir vandens įgerio parametų apskaičiavimą pagal šias formules:

Vandens masės įgerio priaugis po laiko t , %:

$$W_t = \frac{(m_t - m)}{m} \cdot 100; \quad (2.1)$$

čia: m – bandinio masė sausoje būsenoje, g;

m_t – bandinio masė po t laiko vandenyje, g.

Tankis, kg/m^3 :

$$\rho = \frac{m}{(m_{48} - m_{48v})}; \quad (2.2)$$

čia: m_{48} – bandinio masė po 48h, g;

m_{48v} – bandinio masė po 48h vandenyje, g.

Bendrasis poringumas, %:

$$P = \frac{(\rho_\sigma - \rho)}{\rho_\sigma} \cdot 100; \quad (2.3)$$

čia: ρ_σ – susmulkinto betono tankis (2690 kg/m^3).

Uždarasis poringumas, %:

$$P_u = P - P_a; \quad (2.4)$$

čia: P_a – atvirasis poringumas (W_t), %;

2.2.8. Paviršinio šaldymo ir atšildymo metodas

Bandymas atliekamas pagal LST EN 1338 standartą. Bandinių laikymo temperatūra apie 20 ± 2 °C, oro drėgmė apie 50 ± 5 %. Praėjus 28 dienoms po bandinių suformavimo, prizmės 4x4x16 cm įdedamos į šalčio kamerą ir stebimos iki kol bandiniai pradeda trupėti.

Pirmiausiai, atliekama fotofiksacija prieš įdedant bandinius į plastikinę dėžutę su NaCl tirpalu, kad būtų galima vėliau palyginti vizualiai. Plastikinė dėžutė su bandiniu pripildoma 1 cm vandens su 3 % koncentracijos valgomosios druskos (NaCl) tirpalu, uždaroma ir įdedama į šaldytuvą, kur per parą temperatūra keičiasi nuo +20 °C iki -20 °C du kart. Tikrinama kas savaite iki kol pastebimas geometrijos pasikeitimas (nutrupėjimas). Palyginamas plotas prieš bandymą ir po nutrupėjimo, prieinama išvada kiek gramų nutrupėjo per 1 m².

Šis metodas imituoja realias žiemos sąlygas ir šalčio poveikį betono paviršiui. Druskos tirpalo naudojimas padeda įvertinti atsparumą šalčiui ir korozijai, vietovėse kaip Lietuva, kur druskos naudojamos kaip kelių barstymo priemonė. Turint rezultatus, galima įvertinti betono tinkamumą naudoti šaltuose klimatuose.

2.2.9. CO₂ kiekio skaičiavimas

Šio skyriaus tikslas – aprašyti metodiką, pagal kurią apskaičiuojamas skirtingų bandinių (dirbtinio užpildo, trijų skiedinių su skirtingomis granulėmis ir kontrolinio bandinio) anglies dioksido ekvivalentas (GWP, kg CO₂ eq) remiantis A1–A3 gyvavimo ciklo etapų duomenimis. GWP – (angl. – Global Warming Potential) visuotinis atšilimo potencialas. A1–A3 – gyvavimo ciklai, kurie apibūdina žaliavų tiekimo ir gamybos procesus. Skaičiavimai atliekami siekiant įvertinti ar dirbtinai pagamintos medžio pjuvenų granulės sumažina CO₂ kiekį.

Skaičiavimams taikoma produktų sistemos dalinė gyvavimo ciklo analizė (LCA) pagal EN 15804:2012+A2:2019. Vertinama tik A1–A3 etapų įtaka, kuri apima:

- A1 – žaliavų išgavimo ir paruošimo procesus;
- A2 – žaliavų transportą iki gamybos vietos;
- A3 – gamybos procesus.

Kiti etapai (transportas į objektą, eksploatavimas ar šalinimas) į šį tyrimą neįtraukiami. CO₂ pėdsakas apskaičiuotas naudojant deklaruotus GWP (kg CO₂ eq) dydžius, pateiktus ekologinėse produkto deklaracijose (EPD) arba kituose oficialiuose gaminių poveikio aplinkai dokumentuose, nurodytuose 8 ir 9 lentelėse.

Nors vanduo buvo naudojamas visiems bandiniams gaminti, ši medžiaga A1–A3 etapuose neturi reikšmės, todėl į skaičiavimus neįtraukta. Taip pat, dirbtiniui užpildu pagaminti, naudoti skalūniniai pelenai, kurie nevertinami gamyboje, nes papildomo CO₂ nesukelia. Visos kitos medžiagos skaičiavimuose vertinamos.

8 lentelė. Dirbtinio užpildo gamybos GWP (A1–A3) rodikliai

Tiriamoji medžiaga	Deklaruojamas matavimo vienetas	A1–A3 stadijos bendra GWP vertė, kg CO ₂ ekv	Nuoroda į deklaracijos šaltinį
Cementas	1 tona	693	https://cementas.lt/wp-content/uploads/2025/09/NEPD-12216-12214_CEM-II-A-LL-42.5-R.pdf
Medžio pjuvenos	1 m ³ (viename kube 200 kg)	-909	https://manage.epdhub.com/?epd=HUB-0355
Ca(NO ₃) ₂	1 tona	978	https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/918.The_Andersons_Calcium_Nitrate_EPD_verified.pdf

9 lentelė. Skiediniams pagaminti reikalingų medžiagų GWP (A1–A3) rodikliai

Tiriamoji medžiaga	Deklaruojamas matavimo vienetas	A1–A3 stadijos bendra GWP vertė, kg CO ₂ ekv	Nuoroda į deklaraciją
Cementas	1 tona	693	https://cementas.lt/wp-content/uploads/2025/09/NEPD-12216-12214_CEM-II-A-LL-42.5-R.pdf
Superplastiklis	1 kg	0,369	https://www.environdec.com/library/epd6999
Smėlis	1 tona	1,70	https://www.environdec.com/library/epd17322
Keramzito užpildas	1 m ³	34,29	https://www.fi.weber/files/fi/2024-01/Leca-murske-3-8-mm-EPD-ymparistoseloste-EN.pdf
Putstiklio užpildas	1 kg	0,609	https://www.environdec.com/library/epd19856

3. Tyrimų rezultatai ir diskusija

3.1. Pusiau adiabatinis kalorimetro tyrimas

Pusiau adiabatinis kalorimetro tyrimas atliktas keturis kartus, siekiant kuo tiksliau nustatyti visų kintamųjų daromą įtaką cemento hidratacijai.

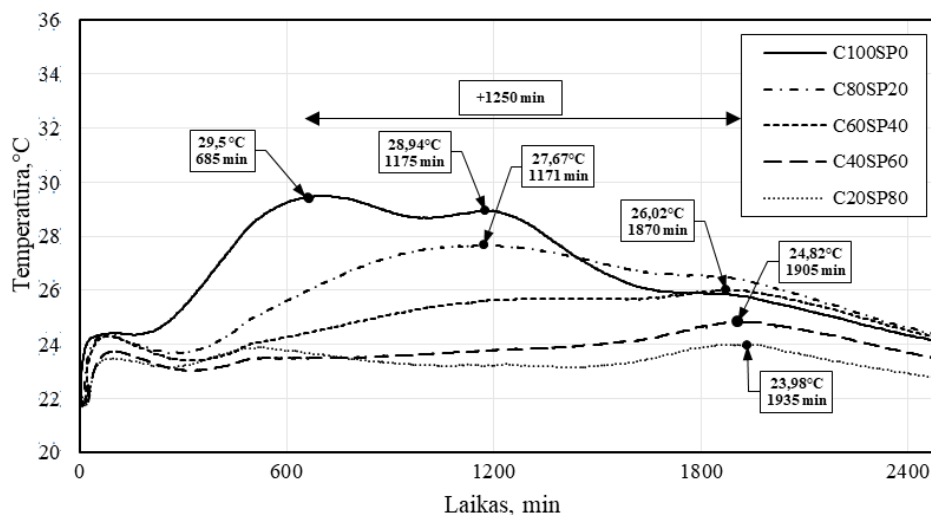
3.1.1. Skalūninių pelenų įtaka hidratacijai

Pirmiausia tyrimas atliekamas siekiant išsiaiškinti cemento ir skalūninių pelenų sąveiką. Tyrimo metu stebėti penkių skirtingų sudėčių bandiniai, sudėtyje pateiktos 10 lentelėje. Atlikus pusiau adiabatinį kalorimetro tyrimą, kuriame cementas buvo iš dalies keičiamas skalūniniais pelenais, nustatyta, kad didėjantis pelenų kiekis reikšmingai veikia cementinės tešlos hidratacijos šilumos išsiskyrimą. Iš grafiko (18 pav.) galima matyti, kad lyginant kontrolinį mišinį C100SP0, kuriame nebuvo pelenų, su mišiniu C80SP20, hidratacijos pikas nutolo apie 490 minučių ir buvo 0,56 °C žemesnis. Didinant pelenų kiekį iki 40 %, piko temperatūra mišinyje C60SP40 sumažėjo iki 28,94 °C, o piko pasislinko iki 1175 minučių nuo reakcijos pradžios. Mišiniuose su 60 % ir 80 % skalūninių pelenų (C40SP60 ir C20SP80) hidratacijos pikas dar labiau pasislinko į vėlesnį laiką – atitinkamai iki 1870 ir 1935 minučių, o maksimali temperatūra sumažėjo iki 26,02 °C ir 23,98 °C.

10 lentelė. Cemento ir skalūninių pelenų sudėtis cementinei tešlai

Žymuo	Cementas, g	Vanduo, g	Skalūniniai pelenai, g
C100SP0	100	35	0
C80SP20	80	35	20
C60SP40	60	35	40
C40SP60	40	35	60
C20SP80	20	35	80

Rezultatai rodo, kad skalūniniai pelenai nutolina hidratacijos procesą. Temperatūros kitimas didėjant pelenų kiekiui nėra tiesinis – didesnės pelenų proporcijos daro įtaką spartesniui hidratacijos piko pasistūmimui. Šį poveikį galėjo lemti mišinio pokyčiai dėl sumažėjusio aktyvios rišamosios medžiagos kiekio.



18 pav. Skalūninių pelenų įtaka cemento hidratacijos procesui

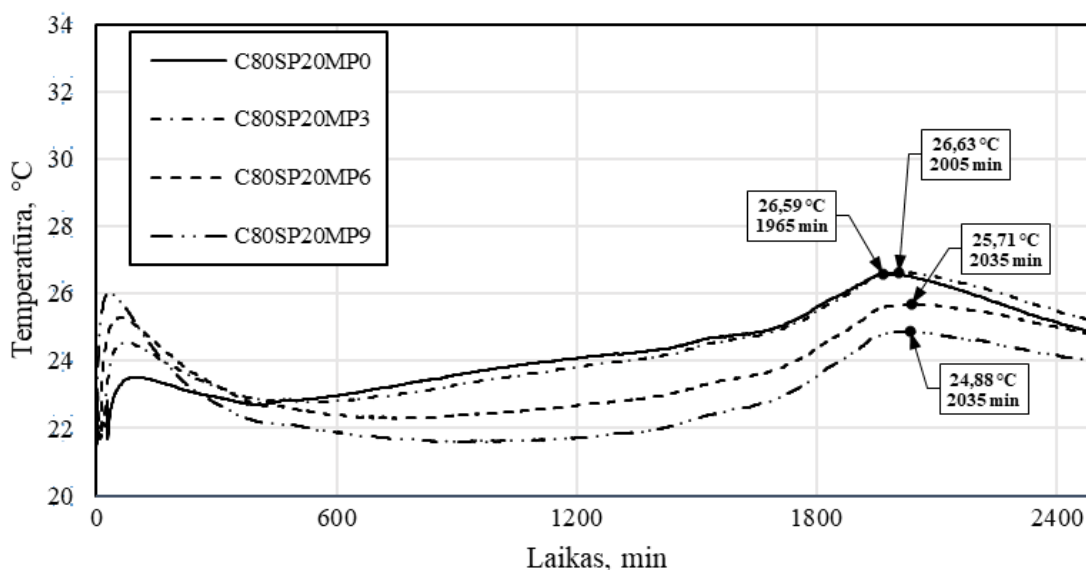
3.1.2. Medžio pjuvenų įtaka cemento ir skalūninių pelenų rišiklio hidratacijos procesams

Sekančiame tyrime cementas sudaro 80 % bandinio, skalūniniai pelenai 20 %, o medžio pjuvenų kiekis kintamas (tikslios sudėtys aprašytos 11 lentelėje). Nustatyta, kad pjuvenų priemaiša papildomai nutolina hidratacijos procesą ir mažina išskiriamą šilumą. Lyginant kontrolinį C80SP20MP0 bandinį, kuriame nebuvo pjuvenų, su 3 g pjuvenų C80SP20MP3 bandiniu, hidratacijos pikas pasislinko apie 40 minučių, o maksimali temperatūra sumažėjo 0,10 °C. Didinant pjuvenų kiekį iki 6 g (C80SP20MP6), pikas dar labiau vėlavo — iki 2035 min nuo bandymo pradžios, o temperatūra sumažėjo iki 25,71 °C. Mišinyje su didžiausiu pjuvenų kiekiu (9 g), hidratacijos pikas nustatytas 2035 min, o maksimali piko temperatūra siekė 24,88 °C, t. y. buvo žemiausia iš visų tirtų mišinių. Visos reikšmės pavaizduotos grafiškai 19 pav.

11 lentelė. Cemento, skalūninių pelenų ir medžio pjuvenų sudėtis cementinei teslai

Žymuo	Cementas + skalūniniai pelenai, g	Vanduo, g	Medžio pjuvenos, g
C80SP20MP0	80 + 20	40	0
C80SP20MP3	80 + 20	40	3
C80SP20MP6	80 + 20	40	6
C80SP20MP9	80 + 20	40	9

Rezultatai rodo, kad didėjantis pjuvenų kiekis sukelia hidratacijos proceso sulėtėjimą bei temperatūros kritimą. Temperatūros kitimo dinamika tarp mišinių pastebimai skyrėsi nuo kontrolinio bandinio — didesni pjuvenų kiekiai lėmė tolygesnę, mažiau ryškią temperatūros kilimo kreivę, o hidratacijos pikas nutolo. Šį poveikį galėjo lemti medžio pjuvenų vandens įgeriamumas, dėl kurio dalis vandens buvo sugertas medienos prieš rišimosi procesą. Dėl to sumažėjo efektyviai hidratacijai prieinamo vandens kiekis, o pati tesla tapo mažiau vientisa. Taip pat padidėjęs pjuvenų kiekis galėjo sutrikdyti šilumos pasiskirstymą mišinyje ir sukelti didesnę mišinio poringumą, kuris dar labiau mažino maksimalios hidratacijos temperatūrą.



19 pav. Medžio pjuvenų įtaka cemento ir skalūninių pelenų hidratacijos procesui

3.1.3. Kalcio nitrato įtaka hidratacijos procesams

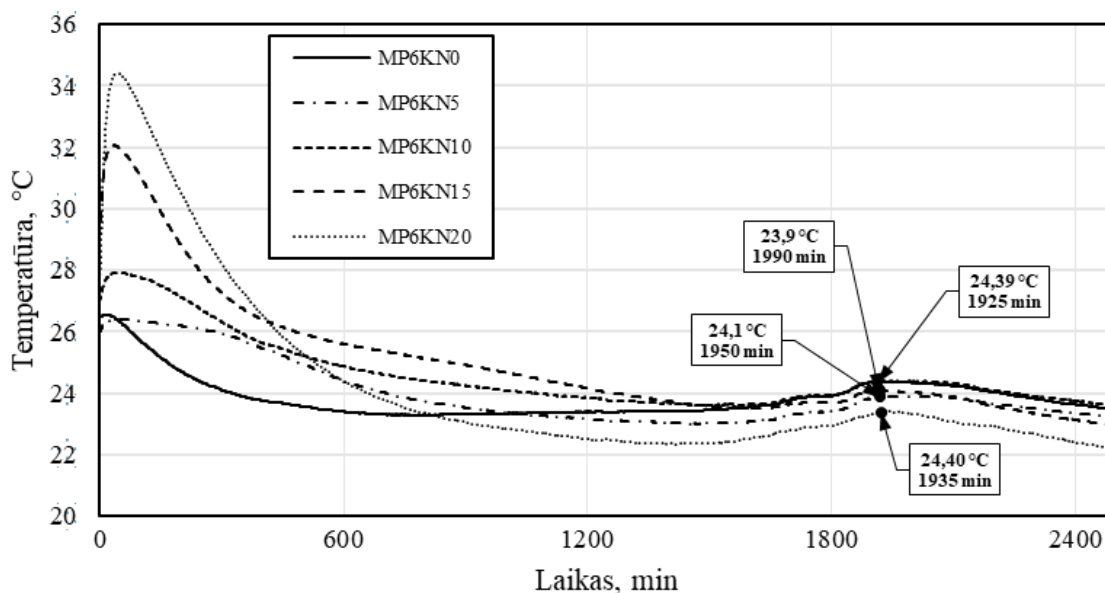
Remiantis 12 lentelėje bei 20 pav. pateiktais duomenimis, nustatyta, kad kalcio nitrato kiekio didinimas cementinėje tešloje, kurioje 20 % cemento pakeista skalūniniais pelenais ir įdėta 6 g medžio pjuvenų, daro įtaką hidratacijos šilumos išsiskyrimui.

12 lentelė. Cemento, skalūninių pelenų, medžio pjuvenų ir kalcio nitrato sudėtis cementinei tešlai

Žymuo	Cementas + skalūniniai pelenai, g	Vanduo, g	Medžio pjuvenos, g	Kalcio nitratas, g
MP6KN0	80 + 20	40	0	0
MP6KN5	80 + 20	35	6	5
MP6KN10	80 + 20	30	6	10
MP6KN15	80 + 20	25	6	15
MP6KN20	80 + 20	20	6	20

Iš grafiko galima matyti, kad bandiniuose su cheminiu priedu pradžioje užkyla temperatūra, kuo didesnis kalcio nitrato kiekis, tuo temperatūra aukštesnė. Tačiau tolesnėje hidratacijos eigoje temperatūra stabilizavosi ir supanašėjo. Didėjant $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ kiekiui nuo 0 iki 20 g, temperatūros pikas kito nedaug, tačiau šiek tiek aukštesnės pikinės temperatūros fiksuotos mišiniuose su didesnėmis nitrato dozėmis. Pvz., MP6KN20 mišinyje pikas pasiektas 1925 minutę, temperatūrai pakilus iki 24,39 °C, kai tuo tarpu MP6KN0 pikas buvo nežymiai žemesnis ir pasiektas anksčiau.

Gauti rezultatai rodo, jog kalcio nitratas neveikia taip stipriai kaip greitikliai, tačiau jis šiek tiek priartina hidratacijos piką.



20 pav. Kalcio nitrato įtaka cemento, skalūninių pelenų ir medžio pjuvenų hidratacijos procesui

3.1.4. Kalcio formiato įtaka hidratacijos procesams

Remiantis 13 lentelėje ir 21 pav. pateiktais duomenimis, nustatyta, kad į cementinę tešlą, kurioje taip pat 20 % cemento pakeista skalūniniais pelenais ir įdėta 6 g medžio pjuvenų, įmaišytas kalcio formiatas daro pastebimą poveikį hidratacijos procesui.

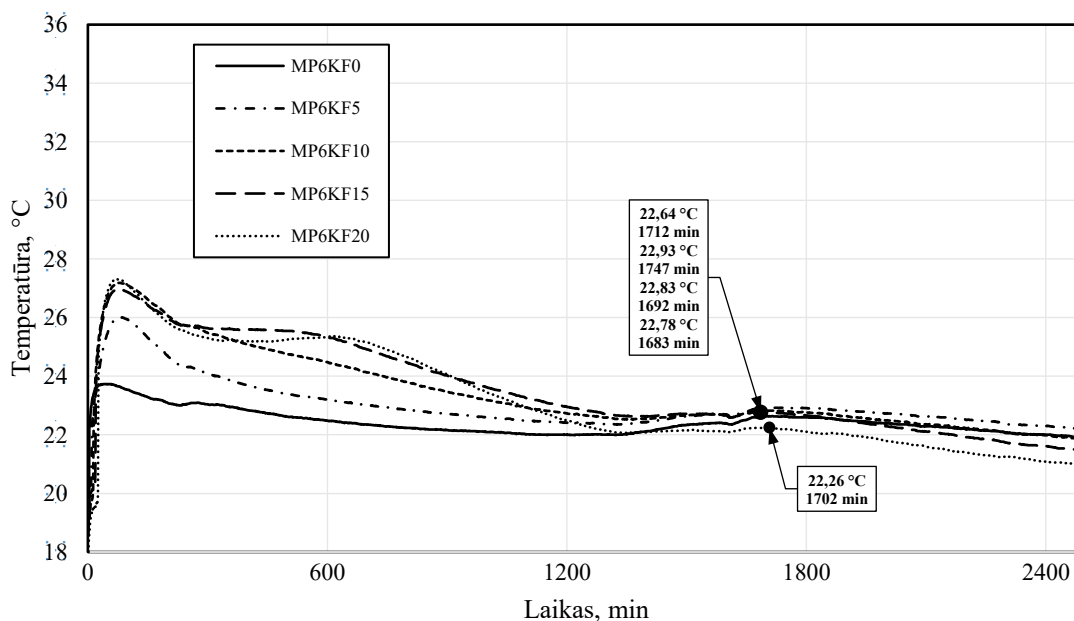
Pradinis temperatūros kilimas visuose mišiniuose su cheminiu priedu buvo ryškus. Tačiau, didėjant kalcio formiato kiekiui, temperatūros kritimas ir stabilizacija vyko greičiau. Mišinys be priedo (MP6KF0) išlaikė aukštesnę temperatūrą ilgesnį laiką, o didžiausią kalcio formiato kiekį turintis mišinys (MP6KF20) greičiausiai pasiekė temperatūros piką.

13 lentelė. Cemento, skalūnų pelenų, medžio pjuvenų ir kalcio formiato sudėtis cementinei tešlai

Žymuo	Cementas + skalūniniai pelenai, g	Vanduo, g	Medžio pjuvenos, g	Kalcio formiatas, g
MP6KF0	80 + 20	40	0	0
MP6KF5	80 + 20	40	6	5
MP6KF10	80 + 20	40	6	10
MP6KF15	80 + 20	40	6	15
MP6KF20	80 + 20	40	6	20

Hidratacijos piko temperatūros taip pat nežymiai mažėjo didėjant formiato kiekiui. Pvz., MP6KF0 pikas buvo aukštesnis, o MP6KF20 – žemiausias, siekiantis apie 22,26 °C ties 1702 minute. Tai rodo, kad kalcio formiatas šiuo atveju neveikia kaip tradicinis hidratacijos greitiklis. Priešingai — jis šiek tiek slopina arba stabilizuoja reakciją, greičiau gražinantis į žemesnės temperatūros būseną.

Šie duomenys leidžia daryti prielaidą, kad kalcio formiatas gali turėti neutralizuojantį poveikį medžio pjuvenų išskiriamiesiems organiniams junginiams, kurie paprastai lėtina hidrataciją. Tačiau rezultatai rodo, kad formiatas neturi ryškaus spartinamojo efekto, bet veikia labiau kaip reakcijos stabilizatorius.



21 pav. Kalcio formiato įtaka cemento, skalūninių pelenų ir medžio pjuvenų hidratacijos procesui

3.2. Medžio pjuvenų apdorojimas, mišinio sudėtis ir granuliavimas

14 lentelėje pateiktos sudėtys dirbtiniui užpildui. KF – medžio pjuvenų ir kalcio formiato užpildas, KN – medžio pjuvenų ir kalcio nitrato užpildas. Pirmoje sudėtyje – 37g kalcio nitrato ir 70g vandens

sumaišoma ir išmirkomos pjuvenos prieš gamybos procesą. Antroje sudėtyje – 20g kalcio formiato miltelių ir 25g vandens skirti mirkyti pjuvenoms.

14 lentelė. Gamintų dirbtinių užpildų sudėtys

Žymuo	Cementas, g	Pjuvenos, g	Cheminis priedas, g	Vanduo, g (viso)	Skalūniniai pelenai, g
KN	100	76	37	117	200
KF	100	78	20	92	200

Granulėms išgauti naudotas diskinis granulatorius (žr. 22 pav.), kurio vidinis skersmuo 500 mm, sienelės aukštis 10 mm, pasvirimo kampas 45 laipsniai.

Eilės tvarka, pagal kurią buvo pilamos medžiagos į granuliatorių:

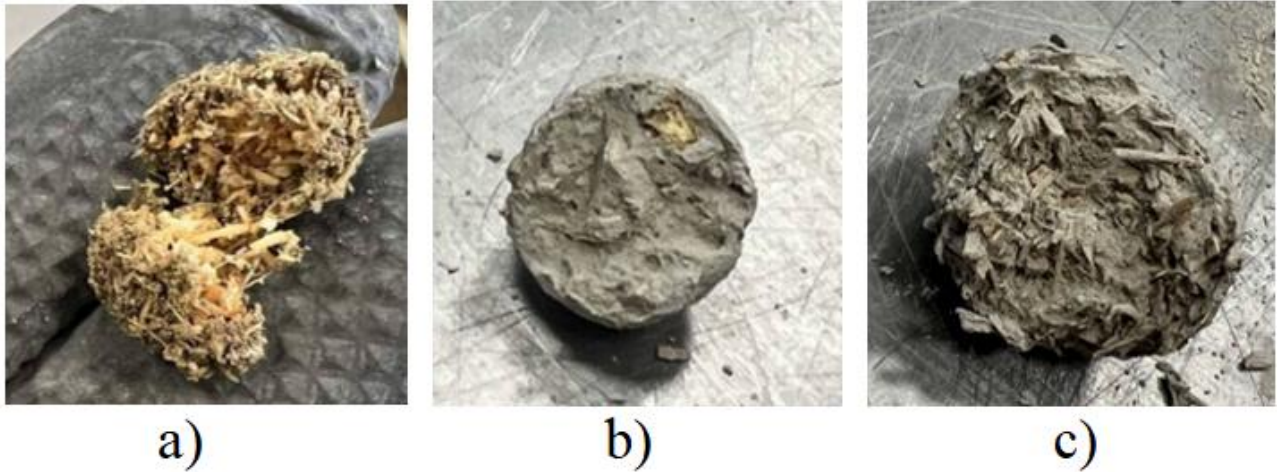
- neutralizuotos medžio pjuvenos;
- cementas kartu su skalūniniais pelenais;
- vanduo.



22 pav. Dirbtinio užpildo, naudojant kalcio nitrata ir kalcio formiatą, gamybos schema

Granuliavimo metu, paimtas nebaigęs formuotis KF užpildas ir perskeltas pusiau, žr. 23 pav. a). Iš nuotraukos matyti, kad užpildo vidinė struktūra yra nevienalytė: vidus išlaiko laisvesnę, nepilnai susispaudusią organinių dalelių sancaupą, o išorinis sluoksnis atrodo labiau suspaustas ir padengtas rišiklio. Tai rodo, kad granuliacijos metu išorinis sluoksnis formuojasi greičiau nei vidinė dalis.

Po 7 dienų kietėjimo, patikrinta dviejų KN užpildų vidinė struktūra, žr. 23 pav. b) ir c). Iš pateiktų vaizdų matyti, kad granulių vidus yra nevienalytis – dalis struktūros atrodo tankesnė, geriau sukibusi, kita dalis išlieka su aiškiai matomomis stambesnėmis dalelėmis. Kairėje matoma granulė atrodo vienesnė ir tankesnė, o dešinėje – labiau sluoksniuota, kas rodo skirtingą užpildo pasiskirstymą arba granuliavimo metu susiformavusį netolygumą.



23 pav. Dirbtinis užpildas perskeltas per pusę a) gamybos metu; b) ir c) po 7 parų kietėjimo

3.3. Užpildų piltinio tankio tyrimo rezultatai

Nustatytas keturių skirtingų dirbtinių užpildų piltinis tankis, tyrimo rezultatai pateikti 15 lentelėje žemiau. Remiantis LST EN 13055:2016 standartu, pagaminti dirbtiniai užpildai su medžio pjuvenomis atitinka lengviesiems užpildams keliamą piltinio tankio sąlygą (tankis negali viršyti 1200 kg/m³).

15 lentelė. Piltinio tankio tyrimo rezultatai

Užpildo tipas	Masė, kg	Piltinis tankis kg/m ³
Keramzito užpildas	0,353	352,88
Granuliuotas putstiklis	0,255	254,98
Medžio pjuvenų granulės su KN	0,682	681,71
Medžio pjuvenų granulės su KF	0,573	573,12
Smėlis	0,182	182,22

3.4. Užpildų granuliometrijos tyrimo rezultatai

Atlikus atsijojimą pagal skirtingus frakcijų dydžius, sudarytas grafikas, atspindintis santykinį ir suminį užpildo pasiskirstymą pagal dalelių dydį (žr. 25 ir 26 pav.).

Iš gautų grafikų prieinama išvada, kad abiejų tipų medžio pjuvenų pagaminto užpildo granulės yra nepastovesnio dydžio, lyginant su keramzito ir putstiklio granulėmis. Taip pat iš grafikų ir paveikslėlių (24 pav.) matoma, kad medžio pjuvenų granulėse vyrauja stambesnio dydžio (apie 6 mm skersmens) granulės nei kituose (apie 1,5 mm skersmens).



a)



b)

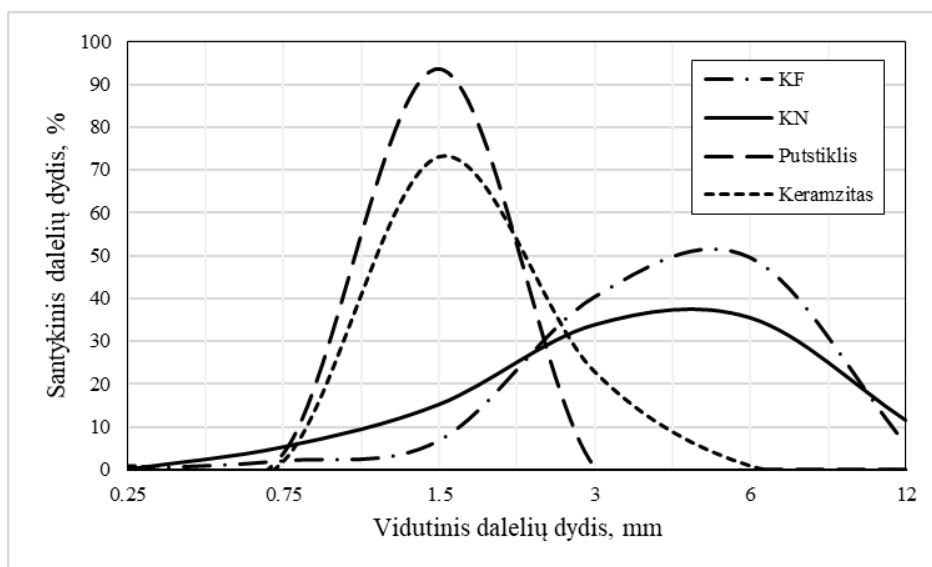


c)

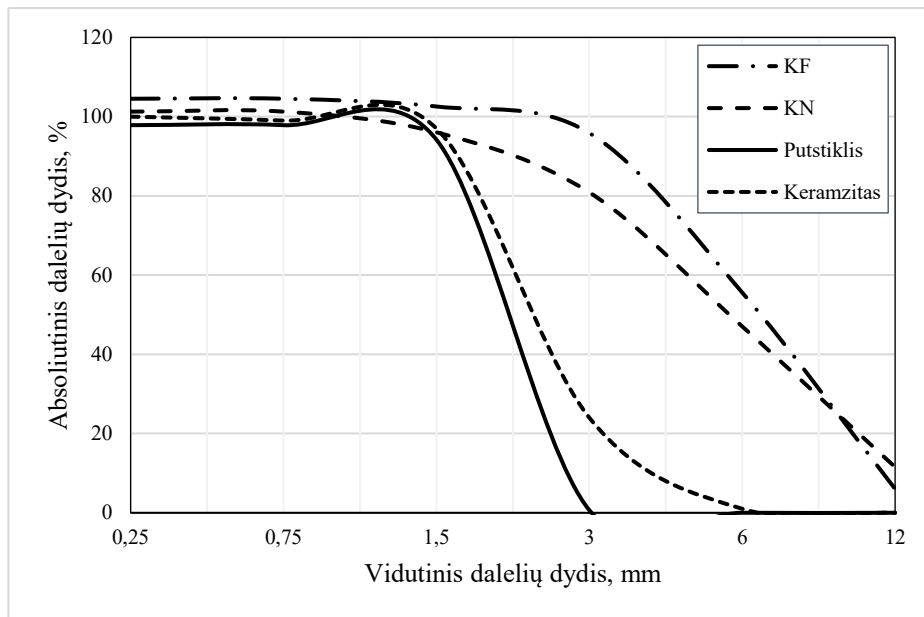


d)

24 pav. Naudoti užpildai granulometrijos tyrimui: a) granuluotas putstiklis; b) keramzito užpildas; c) medžio pjuvenų granulės su KF; d) medžio pjuvenų granulės su KN



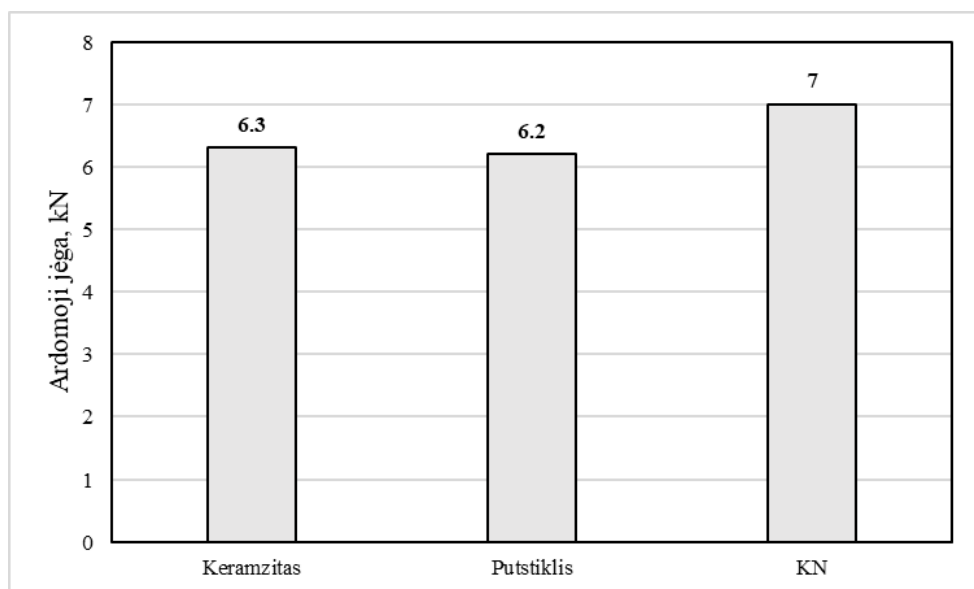
25 pav. Santykinis dalelių pagal dydį pasiskirstymas



26 pav. Suminis dalelių pagal dydį pasiskirstymas

3.5. Dirbtinio užpildo mechaninių savybių tyrimas skalumo metodu

Skalumo būdu nustatytos ardamosios jėgos, deformuojant užpildus 2 cm. Didžiausia ardomoji jėga gauta naudojant dirbtiniu būdu pagamintas KN granules – 7 kN, todėl galima teigti, kad pavyko sukurti užpildą, prilygstantį rinkoje esantiems. Verta paminėti, kad KN užpildas atlaikė 11–13 % didesnę ardomąją jėgą nei kiti. Rezultatų grafikas pateiktas 27 paveikslėlyje.



27 pav. Pagaminto dirbtinio užpildo, naudojant medžio pjuvenas, keramzito ir putstiklio, stiprumas taikant skalumo metodą

3.6. Dirbtinio užpildo įtaka pagrindinėms skiedinio savybėms

Dirbtinis užpildas naudotas skiediniuose, iš kurių pagaminti bandiniai tolimesniems tyrimams, siekiant nustatyti ir palyginti skirtingų užpildų įtaką. Suformuotų bandinių sudėtys ir žymėjimai

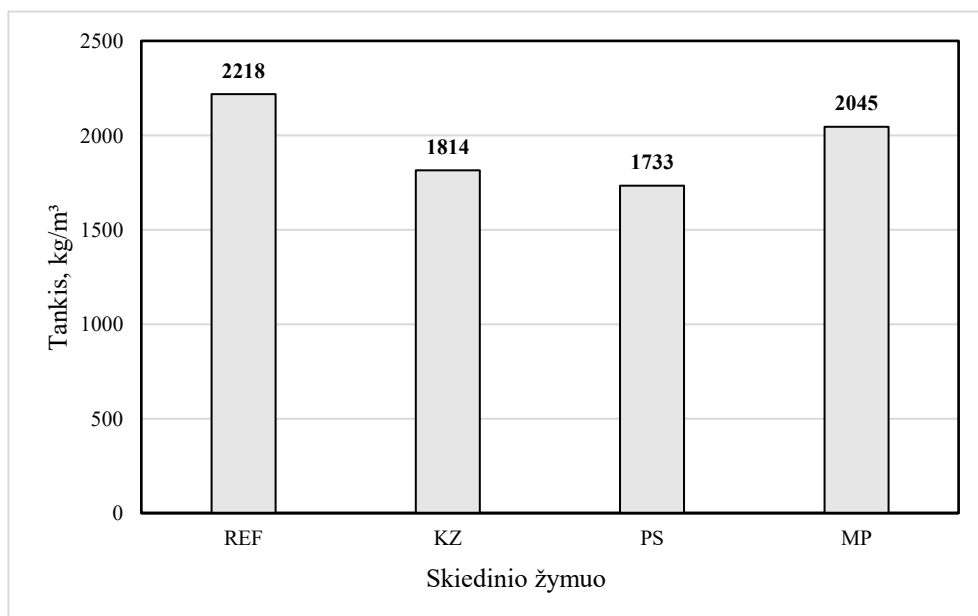
pateikti 16 lentelėje. PS – bandinys, kurio skiedinyje yra putstiklio, kuris pakeitė dalį smėlio. KZ – bandinys, kurio skiedinyje yra keramzito, kuris pakeitė dalį smėlio. REF – bandinys, kurio skiedinyje nėra dirbtinio užpildo. MP – bandinys, kurio skiedinyje yra medžio pjuvenų ir kalcio nitrato užpildo, kuris pakeitė dalį smėlio;

16 lentelė. Skiedinių, naudotų bandiniams, sudėtys

Žymuo	Cementas, g	Smėlis, g	Dirbtinis užpildas, g	Vanduo, g	Superplastiklis, g	Pastaba
1-PS	450	675	104	156	23	Naudotas granuliuotas putstiklis
2-KZ	450	675	134	156	23	Naudotos keramzito granulės
3-REF	450	1350	-	156	23	Kontrolinis bandinys, be dirbtinio užpildo
4-MP	450	675	273	156	23	Medžio pjuvenų granulės su kalcio nitratu

3.6.1. Tankis

Tankio nustatymo metu paaiškėjo, kad keičiant smėlį dirbtiniais užpildais, bandinių tankis mažėja ir jie tampa lengvesni. Didžiausias tankis nustatytas kontroliniame mišinyje – 2217,6 kg/m³. Mažiausia tankį turi PS bandinys – tankis sumažėjo 21,8 % nuo kontrolinio bandinio (REF). Šių užpildų (putstiklio) piltinis tankis taip pat buvo mažiausias. MP bandinio tankis mažiausiai atsiliko nuo REF bandinio – tankis skyrėsi per 7,8 %. Rezultatai pateikti grafiškai žemiau (28 pav.).

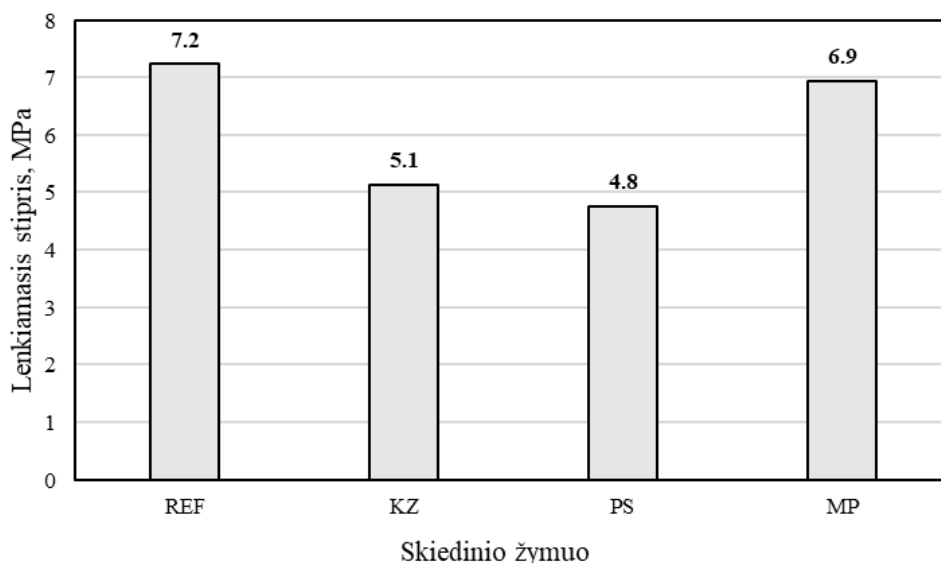


28 pav. Bandinių tankio rezultatai

Gautas bandinio tankis yra didesnis, nei kitų autorių tyrimuose. Tai galėjo lemti, kad naudojamos dirbtinio užpildo granulės, kurios didina bendrą skiedinio tankį, lyginant su medžio pjuvenomis.

3.6.2. Lenkimo stiprio tyrimas

Lenkimo bandymo rezultatai parodė, kad smėlio pakeitimas dirbtiniais užpildais lemia lenkiamojo stiprio mažėjimą. Tiriamasis bandinys MP pasiekė 6,94 MPa, t. y. jo stipris sumažėjo nežymiai, maždaug 4,0 % lyginant su kontroliniu, todėl MP galima laikyti artimu kontrolinio bandinio mechaninėms savybėms. Tuo tarpu PS (4,76 MPa) ir KZ (5,14 MPa) bandiniai pasireiškė žymiai didesniu stiprumo nuosmikiu: jų sumažėjimas, lyginant su REF, siekia atitinkamai apie 34,2 % ir 28,9 %. Šie rezultatai rodo, kad MP mišinys pasižymi gerokai palankesnėmis lenkiamosiomis savybėmis nei PS ir KZ, o didėjantis dirbtinių užpildų kiekis turi stiprią neigiamą įtaką lenkiamajam stipriui. Lenkimo stiprio rezultatai grafiškai pateikiami 29 pav.

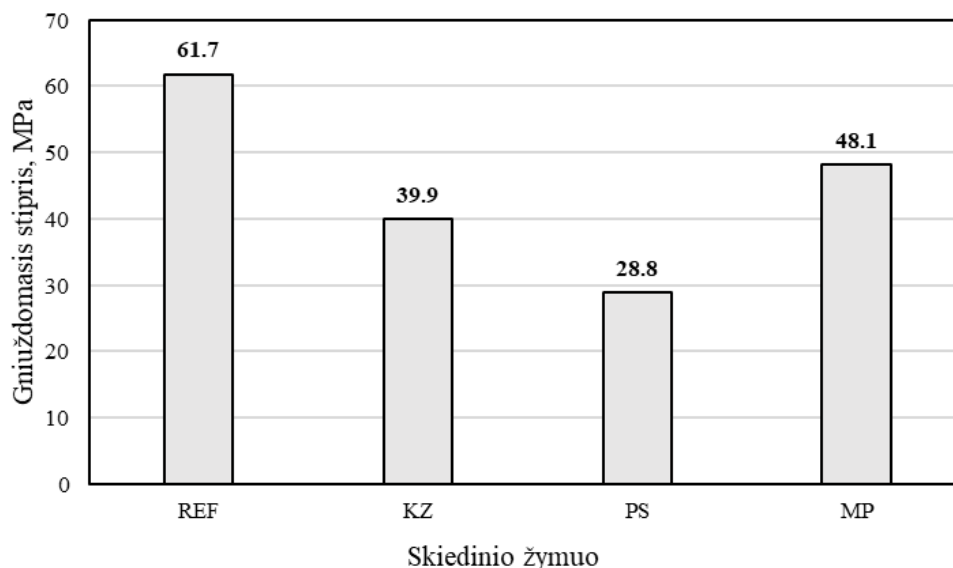


29 pav. Lenkiamojo stiprio rezultatai

Gauti lenkiamojo stiprio rezultatai yra geresni už literatūros analizėje aptartus tyrimų rezultatus (gauti lenkimo stipriai – 5 MPa, 1,3 MPa ir 2,05 MPa [39, 40]), tai galėjo lemti pasirinkimas gaminti dirbtinį užpildą ir dėti į skiedinį kaip granules, o ne paprastas medžio pjuvenas.

3.6.3. Gniuždymo stiprio tyrimas

Gniuždymo bandymo rezultatai parodė, kad smėlio pakeitimas dirbtiniais užpildais mažina mišinių gniuždomąjį stiprį, tačiau poveikis priklauso nuo užpildų kiekio ir tipo. Kontrolinis bandinys (REF) išlaikė didžiausią gniuždomąjį stiprį – 61,72 MPa. Pagrindinis tiriamasis bandinys MP pasiekė 48,11 MPa, todėl jo stiprumas, lyginant su kontroliniu, sumažėjo apie 22,1 %, tačiau vis dar išlieka ženkliai didesnis nei kitų bandinių. PS (28,81 MPa) ir KZ (39,86 MPa) parodė kur kas mažesnius rezultatus – jų gniuždomasis stipris, lyginant su REF, sumažėjo atitinkamai apie 53,3 % ir 35,4 %. Šie duomenys rodo, kad MP mišinys išsiskiria geresnėmis gniuždomosiomis savybėmis nei PS ir KZ, o didesnis dirbtinių užpildų kiekis lemia ryškų stiprio kritimą. Gniuždomojo stiprio rezultatai grafiškai pateikiami 30 pav.

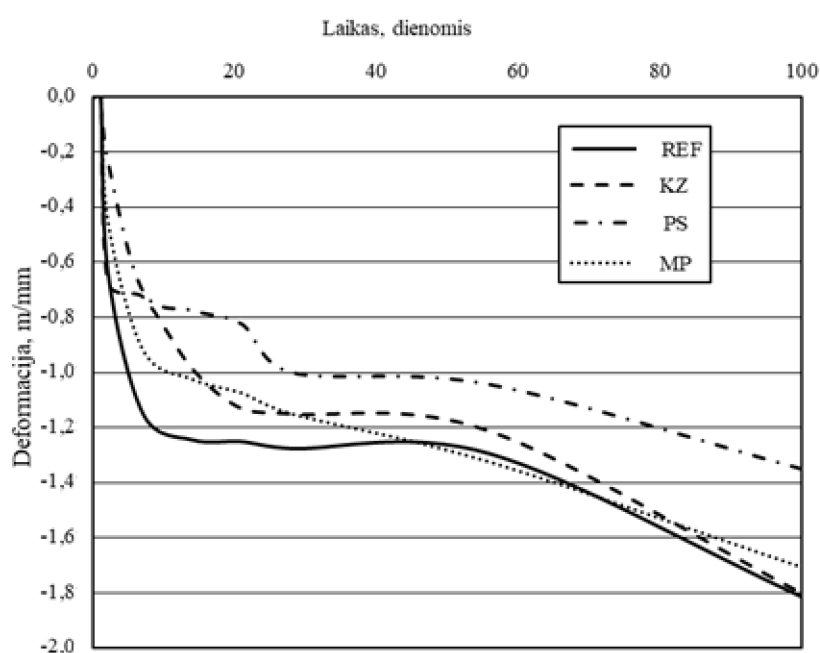


30 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai

Gauti rezultatai lenkia literatūros analizėje aptartus tyrimų rezultatus (gauti gniuždymo stipriai svyruoja nuo – 8 MPa iki 26 MPa [39, 40]), tai galėjo lemti pasirinkimas gaminti dirbtinį užpildą ir dėti į skiedinį kaip granules, o ne paprastas medžio pjūvenas.

3.6.4. Susitraukimo deformacijų tyrimas

Tyrimo metu nustatyta, kad bandiniai su dirbtiniais užpildais traukiasi mažiau, lyginant su kontroliniu bandiniu. MP gaminio deformavimasis yra stabilus ir mažesnis lyginant su PS ir KZ. Pradiniuose matavimuose MP deformacija yra artima REF bandiniui, o vėliau beveik sutampa su kontroliniu bandiniu, arba deformacijos mažesnės. Šiuo bandymu nustatyta, kad MP bandinys pasižymi geresniu ilgalaikiu matmenų stabilumu ir deformacija artima REF bandiniui, deformacijos žymiai palankesnės nei PS ir KZ. Rezultatų grafikas pateiktas 31 paveikslėlyje.



31 pav. Užpildo įtaka tirto skiedinio susitraukimo deformacijoms

3.6.5. Poringumo ir vandens įgeriamumo tyrimas

Poringumo bandymo rezultatai (žr. 17 lentelėje) parodė, kad lyginant su kontroliniu bandiniu (REF), didžiausiu bendruoju poringumu pasižymėjo PS ir KZ bandiniai – jų bendrasis poringumas (P_p) siekė atitinkamai 36,55 % ir 27,64 %, t. y. buvo ženkliai didesnis nei REF (23,91 %). Tiriamasis MP bandinys išlaikė artimiausią kontroliniam rezultatą – 23,60 %. Bandymas parodė, kad jo parametrai artimesni REF bandiniui nei PS ar KZ mišinių.

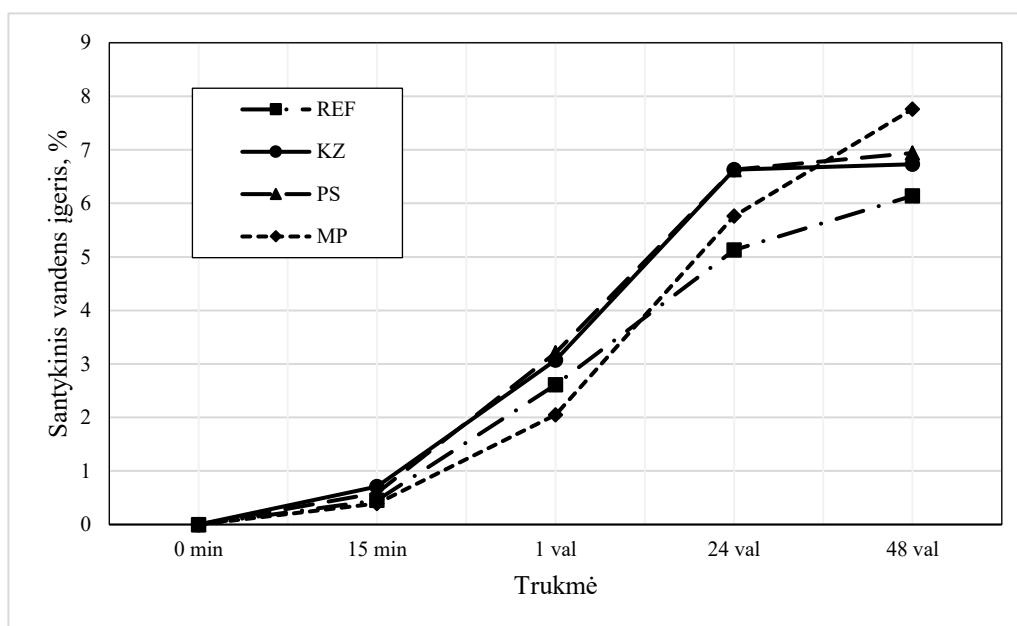
Vertinant atvirąjį poringumą (P_a), daugiausia atvirų porų turėjo MP bandinys (15,94 %), o mažiausiai – PS (11,84 %) ir REF (12,57 %).

Uždarusis poringumas (P_u) didžiausias nustatytas PS bandinyje (24,72 %), o mažiausias – MP (7,66 %), kuris ženkliai skiriasi nuo kitų mišinių ir kontrolinio bandinio (11,34 %). Tai rodo, kad MP bandinyje vyrauja atviros, o ne uždaros poros, kas gali lemti kitokį vandens įgeriamumą nei PS ar KZ.

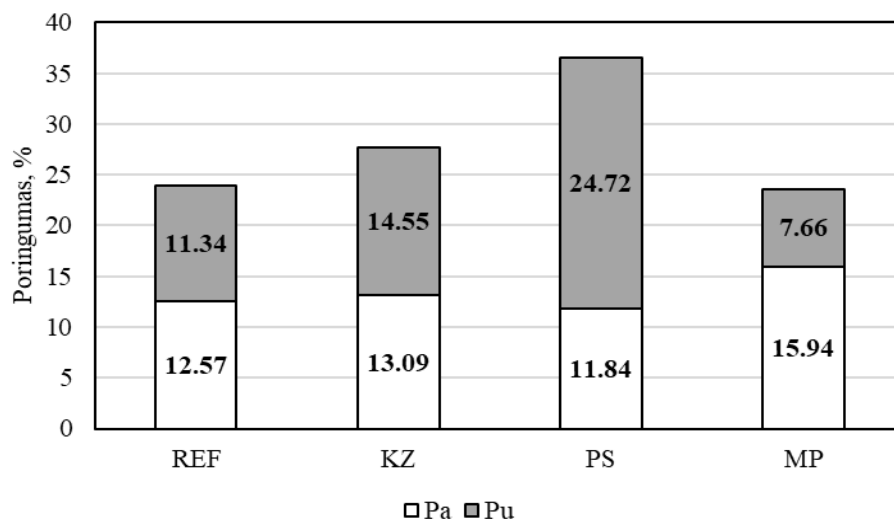
Apibendrinus galima teigti, kad PS ir KZ mišiniuose dirbtiniai užpildai didina bendrąjį bei uždarąjį poringumą, o MP bandinio parametrai išlieka artimesni kontroliniam bandiniui, nors pasižymi didesniu atvirų porų kiekiu. Rezultatai pateikti grafiškai 32 ir 33 paveikslėliuose.

17 lentelė. Poringumo ir vandens įgeriamumo matavimai

Žymėjimas	Masė sauso	Masė 15 min	Masė 1h	Masė 24h	Masė 48h	Masė vandenyje	P_p	P_a	P_u
REF	552,84	555,35	567,28	581,2	586,78	316,7	23,91	12,57	11,34
PS	446,18	448,80	460,51	475,75	477,13	215,70	36,55	11,84	24,72
KZ	436,19	439,27	449,56	465,12	465,53	241,44	27,64	13,09	14,55
MP	497,85	499,77	508,06	526,55	536,46	294,23	23,60	15,94	7,66



32 pav. Dirbtinio užpildo įtaka tiriamo skiedinio vandens įgeriui

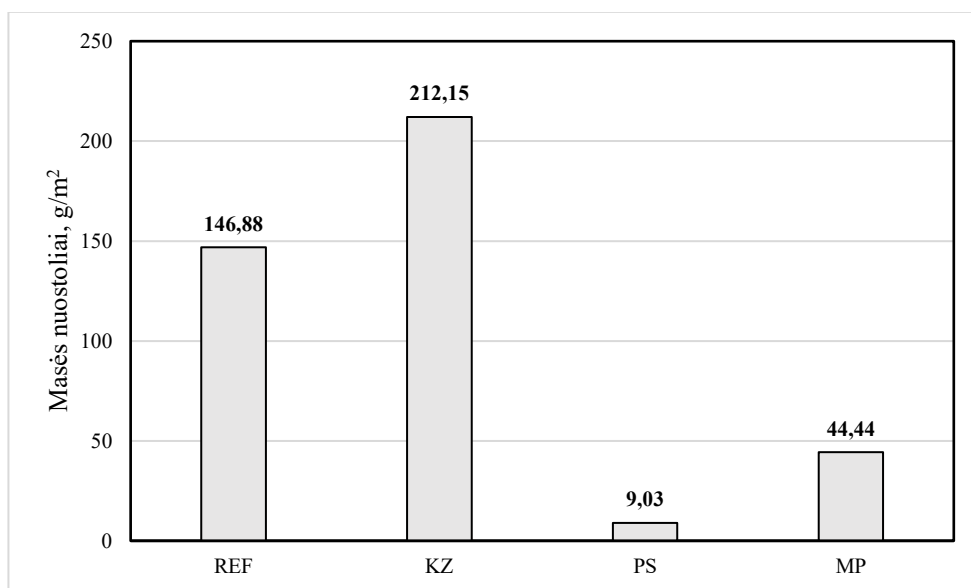


33 pav. Tirtų užpildų įtaka atviram, uždaram ir pilnam poringumui

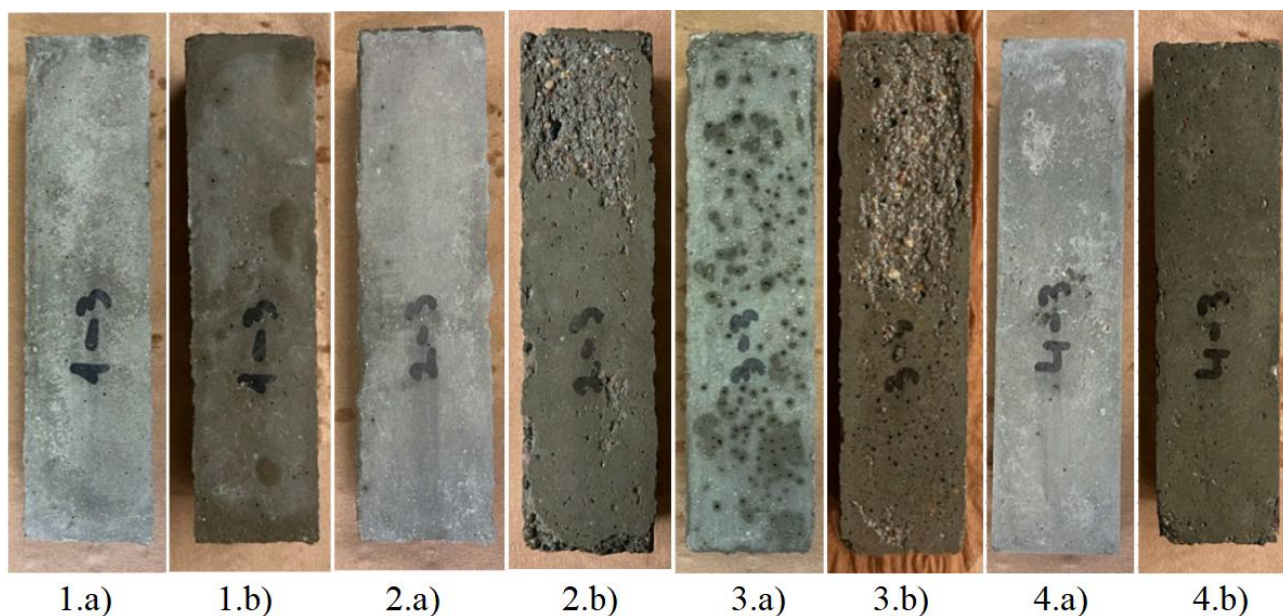
Kiti mokslininkai pastebėjo, kad dėl medžio pjuvenų vandens įgeriamumas didėja [40, 44]. Šiame tyrime sukurti dirbtiniai užpildai taip pat didino vandens įgeriamumą. Taip yra todėl, nes pjuvenų dalelės yra porėtos, tad efektyviai sugeria vandenį.

3.6.6. Atsparumo šalčiui tyrimas

Atsparumas šalčiui buvo vertinamas analizuojant bandinių paviršiaus irimą, pasireiškiantį dalelių nubyrėjimu druskos tirpale. Per pirmus 28 ciklus nebuvo nustatyta jokių pažeidimų nė viename bandinyje, todėl tyrimas pratęstas iki 100 ciklų. Pasibaigus bandymui, didžiausias paviršiaus irimas buvo pastebėtas KZ bandinyje, kurio masės nuostoliai siekė 212,15 g/m², o kontrolinis REF bandinys patyrė 146,88 g/m² nuostolį. Tiriamasis MP bandinys pasižymėjo gerokai mažesniu nubyrėjimo kiekiu – 44,44 g/m², o mažiausias irimas nustatytas PS mėginyje (9,03 g/m²). Šie rezultatai rodo, kad MP mišinys yra žymiai atsparesnis šalčio sukeliama paviršiaus ardymui nei REF ir KZ bandiniai, tačiau nusileidžia PS, kuriame irimas buvo beveik nežymus. Rezultatai grafiškai pateikiami 34 pav., o bandinių pažaidos 35 pav.



34 pav. Masės nuostoliai po 100 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų 3 procentų NaCl tirpale



35 pav. Vizuali apžiūra, prieš (a) ir po (b) 100 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklą 3 procentų NaCl tirpale
1) bandinys su putstiklio užpildu; 2) bandinys su keramzito granulėmis; 3) kontrolinis bandinys; 4) bandinys su medžio pjuvenų granulėmis

3.6.7. CO₂ kiekio skaičiavimas

Pirmiausiai įvertinti pagaminto dirbtinio užpildo CO₂ kiekiai (žr. 18 lentelę), gauta neigiama reikšmė (-0,245 kg). Neigiama vertė reiškia, jog panaudojus gautą medžiagą tolimesnei gamybai, bendras produkto CO₂ rodiklis sumažėja.

18 lentelė. Dirbtinio užpildo su medžio pjuvenomis paskaičiuotas CO₂ pėdsakas

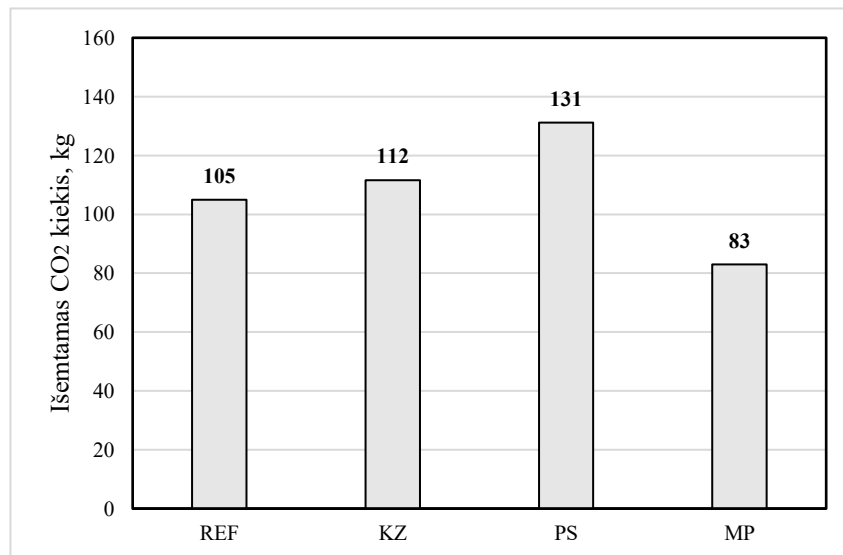
Medžiaga	Kiekis, g	Paskaičiuotas kiekis, kg CO ₂ ekv
Cementas	100	0,0693
Medžio pjuvenos	76	-0,350
Ca(NO ₃) ₂	37	0,0362
Vanduo	117	-
Skalūniniai pelenai	200	-
Viso:		-0,245

Apskaičiavus CO₂ pėdsaką, tenkantį 1 kg dirbtinio užpildo gamybai, gauta neigiama -0,245 kg reikšmė. Ši neigiama vertė rodo, kad dirbtinio užpildo panaudojimas tolesniems skiedinių produktams mažina bendrą jų CO₂ emisijų kiekį. Visų medžiagų išmetamų CO₂ rodikliai pateikti 19 lentelėje, grafikas pateiktas 36 paveikslėlyje.

19 lentelė. Naudotų medžiagų paskaičiuotas CO₂ pėdsakas

Medžiaga	Kiekis, g	Paskaičiuotas kiekis, kg CO ₂ ekv
Cementas	450	0,3118500
Superplastiklis	23	0,0084870
Smėlis	675	0,0011475

Smėlis	1350	0,0029520
Dirbtinis užpildas su medžio pjuvenomis	273	-0,0668850
Keramzito užpildas	134	0,022000
Putstiklio užpildas	104	0,081600



36 pav. Skiedinių CO₂ pėdsako rodikliai

Iš pateiktų duomenų matyti, kad mažiausią CO₂ pėdsaką turi MP bandinys (83 kg į 1 m³), o didžiausią – PS bandinys (131 kg į 1 m³). KZ ir REF bandiniai pasižymi vidutiniais rodikliais (atitinkamai 112 ir 105 kg į 1 m³). Tai rodo, kad užpildo tipas reikšmingai veikia išmetamo CO₂ kiekį.

Išvados

1. Atlikus pusiau adiabtinio kalorimetro tyrimą keturis kartus, nustatyta, kad skalūniniai pelenai nutolina hidratacijos procesą, didinant medžio pjuvenų kiekį, taip pat letėja hidratacijos procesas. Įtraukus cheminius priedus kalcio nitrata ir kalcio formiatą, pastebėta, kad didant jo kiekį, didelio skirtumo nesusidaro. Tačiau priimta, kad šie cheminiai priedai neutralizuoja medžio pjuvenas.
2. Sukurtas dirbtinis užpildas pagal numatytą technologiją, kuris pagal piltinį tankį ($681,71 \text{ kg/m}^3$ ir $573,12 \text{ kg/m}^3$) priskiriamas prie lengvųjų užpildų (sąlyga: $<1200 \text{ kg/m}^3$).
3. Iširtos pagrindinės sukurto užpildo fizikines ir mechanines savybės:
 - 3.1 pagamintos medžio pjuvenų granulės yra nepastovaus dydžio, daugiausiai vyrauja granulės, kurių skersmuo yra apie 6 mm;
 - 3.2 skalumo bandymo metu nustatyta, kad pagamintas dirbtinis užpildas su kalcio nitrato priedu, atlaiko 12 % didesnę ardomąją jėgą, nei lyginami keramzito ir putstiklio užpildai;
4. Iširtos pagrindinės sukietėjusio betono su dirbtiniu užpildu fizikines ir mechanines savybės:
 - 4.1 panaudojus granulės skiediniuose, gautas jų tankis, kuris yra 8 % mažesnis, nei kontrolinio bandinio;
 - 4.2 lenkiamojo stiprio tyrime bandinys su pagamintomis granulėmis atsiliko 4 % nuo kontrolinio bandinio, o gniuždomojo stiprio tyrime atsilikimas siekė 22 %;
 - 4.3 atlikus susitraukimo deformacijų tyrimą, priimta išvada, kad bandiniai su dirbtiniais užpildais traukiasi mažiau nei kontrolinis bandinys;
 - 4.4 poringumo tyrimo metu gauti rezultatai rodo, kad kontrolinis bandinys nuo bandinio su medžio pjuvenų granulėmis beveik nesiskiria bendrojo poringumo rezultatais, tačiau vertinant atvirąjį poringumą, MP bandinys turi daugiausiai atvirų porų (15,94 %). Vandens įgeriamumas bandinio su medžio pjuvenomis pradžioje buvo didesnis nei kontrolinio, tačiau mažesnis nei bandinių su kitomis dirbtinėmis granulėmis. Tačiau, po 48 valandų, bandinys su medžio pjuvenų granulėmis įgėrė didžiausią kiekį vandens, svoris padidėjo beveik 8 %;
 - 4.5 tiriamasis MP bandinys, atsparumo šalčiui tyrimo metu, nubyrejo $44,44 \text{ g/m}^2$, kai tuo tarpu kontroliniame bandinyje nubyrejimo nuostoliai siekė $146,88 \text{ g/m}^2$;
 - 4.6 apskaičiavus CO_2 pėdsaką, nustatyta, kad naudojant medžio pjuvenų granules betone, sumažiname išmetamąsias dujas per 21 % A1–A3 gyvavimo ciklo stadijose.

Šiame tyrime tirta tik tam tikra pjuvenų frakcija, naudotas CEM II cemento tipas. Siūloma kryptis tolimesniems tyrimams – sudėties optimizavimas ir dirbtinio užpildo praktinis pritaikymas statybos sektoriuje.

Literatūros sąrašas

1. European Commission. European Green Deal - State of play and way forward = Exchange of views; European Commission: Brussels, Belgium, 2024. Prieiga per: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-9775-2024-INIT/lt/pdf..>
2. Lietuvos Respublikos Vyriausybė. 582 Dėl medienos ir kitų organinių medžiagų iš atsinaujinančių gamtos išteklių pagrindu pagamintų statybos produktų naudojimo visuomeninės paskirties pastatuose. TAR, 2023-07-20, Nr. 14886 .
3. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija - Studija. Medienos panaudojimas statyboje. , 2024..
4. FERREIRA, Saulo Rocha; MENDES DE ANDRADE, Rodolfo Giacomim; KOENDERS, Eduardus; DE ANDRADE SILVA, Flávio; DE MORAES REGO FAIRBAIRN, Eduardo ir kt. Pull-out behavior and tensile response of natural fibers under different relative humidity levels. *Construction and Building Materials*, vol. 308 (2021), pp. 124823. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821025757..>
5. CZAPLA, Aleksander; GANESAPILLAI, Mahesh ir DREWNOWSKI, Jakub. Composite as a Material of the Future in the Era of Green Deal Implementation Strategies. *Processes*, vol. 9 (2021), nr. 12.
6. CHOVANCOVÁ, Jana; PETRUŠKA, Igor; PATA, Ugur Korkut ir ADAMIŠIN, Peter. Diverse pathways to decarbonization: cluster-specific impacts of energy sources on CO2 emissions in the European Union. *Energy Nexus*, vol. 17 (2025), pp. 100367. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125000087..>
7. International Energy Agency. Global Energy Review 2025: CO₂ Emissions. [2025[žiūrėta -05-18]]. Paryžius: IEA, 2025 In: . Prieiga per: Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>.
8. International Energy Agency. Lithuania – Countries & Regions. [2025[žiūrėta -05-18]]. Paryžius: IEA, 2023 In: . Prieiga per: Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/countries/lithuania>.
9. International Energy Agency. Latvia – Countries & Regions [Interaktyvus]. [2025[žiūrėta -05-18]]. Paryžius: IEA, 2023 In: . Prieiga per: Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/countries/latvia>.
10. International Energy Agency. Estonia – Countries & Regions [Interaktyvus]. Paryžius: IEA, 2023 [Žiūrėta 2025-05-18]. Prieiga Per Internetą: <https://www.iea.org/countries/estonia>.
11. International Energy Agency. Germany – Countries & Regions [Interaktyvus]. Paryžius: IEA, 2023 [Žiūrėta 2025-05-18]. Prieiga Per Internetą: <https://www.iea.org/countries/germany>.
12. OSTOVARI, Hesam; MÜLLER, Leonard; SKOCEK, Jan ir BARDOW, André. From Unavoidable CO₂ Source to CO₂ Sink? A Cement Industry Based on CO₂ Mineralization. *Environmental science & technology*, vol. 55 (2021), nr. 8, pp. 5212–5223. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07599>.
13. MASTALI, M.; DALVAND, A. ir SATTARIFARD, A. R. The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers. *Journal of Cleaner Production*, vol. 124 (2016), pp. 312–324. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616300695>.
14. SONG, Dan; YANG, Jin; CHEN, Bin; HAYAT, Tasawar ir ALSAEDI, Ahmed. Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain. *Applied Energy*, vol. 164

- (2016), pp. 916–923. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915010715>.
15. AKHTAR, Mohammad Nadeem; BANI-HANI, Khaldoon A.; MALKAWI, Dima A. Husein ir ALBATAYNEH, Omar. Suitability of sustainable sand for concrete manufacturing - A complete review of recycled and desert sand substitution. *Results in Engineering*, vol. 23 (2024), pp. 102478. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024007333>.
 16. FLOWER, David J. M. ir SANJAYAN, Jay G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 12 (2007), nr. 5, pp. 282–288. Prieiga per: <https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>.
 17. ZHAO, Jianheng; WEI, Xinyuan ir LI, Ling. The potential for storing carbon by harvested wood products. *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 5 (2022), pp. 1055410.
 18. HEMMATI, Mahboobeh; MESSADI, Tahar; GU, Hongmei; SEDDELMEYER, Jacob ir HEMMATI, Moein. Comparison of Embodied Carbon Footprint of a Mass Timber Building Structure with a Steel Equivalent. *Buildings*, vol. 14 (2024), nr. 5.
 19. DZHURKO, Daria; HAACKE, Ben; HABERBOSCH, Asta; KÖHNE, Linde; KÖNIG, Nora ir kt. Future buildings as carbon sinks: Comparative analysis of timber-based building typologies regarding their carbon emissions and storage. *Frontiers in Built Environment*, vol. olume 10 - 2024 (2024). Prieiga per: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2024.1330105>.
 20. PSCI, Keegan R. Cement and Concrete: The Environmental Impact - PSCI. [2020, November 3]. Prieiga per: <https://psi.princeton.edu/tips/2020/11/3/cement-and-concrete-the-environmental-impact>.
 21. OLAIYA, Bamidele Charles; LAWAN, Mustapha Muhammad ir OLONADE, Kolawole Adisa. Utilization of sawdust composites in construction—a review. *SN Applied Sciences*, vol. 5 (2023), nr. 5, pp. 140. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05361-4>.
 22. TURGUT, Paki ir MURAT ALGIN, Halil. Limestone dust and wood sawdust as brick material. *Building and Environment*, vol. 42 (2007), nr. 9, pp. 3399–3403. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306002290>.
 23. OWEBOR, Kesiena; OTUAGOMA, Smith Orose; EYENUBO, Ogheneakpobo Jonathan; URANTA, Arthur Gogo; UKRAKPOR, Friday Erhimudia ir kt. Technical Analysis of Sawdust-to-Power: A Paradigm Shift in Waste Management in a Typical Developing Economy. *Journal of Energy and Power Technology*, vol. 05 (2023), nr. 04, pp. 033. Prieiga per: <https://doi.org/10.21926/jept.2304033>.
 24. AHMED, Wisal; KHUSHNOOD, Rao Arsalan; MEMON, Shazim Ali; AHMAD, Sajjad; BALOCH, Waqas Latif ir kt. 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*, vol. 184 (2018), pp. 1016–1027. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618306589>.
 25. SOSOI, Gavril; ABID, Cherifa; BARBUTA, Marinela; BURLACU, Andrei; BALAN, Marius C. ir kt. Experimental Investigation on Mechanical and Thermal Properties of Concrete Using Waste Materials as an Aggregate Substitution. *Materials*, vol. 15 (2022), nr. 5.
 26. HORABIK, Józef; BAŃDA, Maciej; JÓZEFACIUK, Grzegorz; ADAMCZUK, Agnieszka; POLAKOWSKI, Cezary ir kt. Breakage Strength of Wood Sawdust Pellets: Measurements and Modelling. *Materials*, vol. 14 (2021), nr. 12.

27. MENGIST, Muluken; WOLDEYES, Belay ir GABBIYE, Nigus. Production and Characterization of Sawdust Briquettes for Firewood Substitution. In: *Advances of Science and*, pp. 3–26. Cham: Springer International Publishing, 2021.
28. SCHILD, Anna; COOL, Julie; BARBU, Marius-Catalin ir AND SMITH, Gregory D. Feasibility of substituting core layer strands in randomly OSB with contaminated waste wood particles. *Wood Material Science & Engineering*, vol. 16 (2021), nr. 3, pp. 170–177. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1652682>.
29. MALJAE, Hamid; MADADI, Rozita; PAIVA, Helena; TARELHO, Luis ir FERREIRA, Victor M. Incorporation of biochar in cementitious materials: A roadmap of biochar selection. *Construction and Building Materials*, vol. 283 (2021), pp. 122757. Prieiga per: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0950061821005171>.
30. RAHMAN, Arafater ir KHONDOKER, Mohammad A. Effect of Treatment Methods on Material Properties and Performance of Sawdust-Concrete and Sawdust-Polymer Composites. *Polymers*, vol. 16 (2024), nr. 23.
31. SIDIRAS, D.; BATZIAS, F.; SCHROEDER, E.; RANJAN, R. ir TSAPATSIS, M. Dye adsorption on autohydrolyzed pine sawdust in batch and fixed-bed systems. *Chemical Engineering Journal*, vol. 171 (2011), nr. 3, pp. 883–896. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894711004815>.
32. LI, Mei-Chun; WU, Qinglin; SONG, Kunlin; LEE, Sunyoung; QING, Yan ir kt. Cellulose Nanoparticles: Structure–Morphology–Rheology Relationships. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 3 (2015), pp. 150407061249007.
33. JOHN, Elisabeth ir LOTHENBACH, Barbara. Cement hydration mechanisms through time – a review. *Journal of Materials Science*, vol. 58 (2023), nr. 24, pp. 9805–9833. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08651-9>.
34. THAKUR, Vijay Kumar; THAKUR, Manju Kumari ir AND GUPTA, Raju Kumar. Review: Raw Natural Fiber–Based Polymer Composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 19 (2014), nr. 3, pp. 256–271. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/1023666X.2014.880016>.
35. VAICKELIONIS, Giedrius ir VAICKELIONIENE, Rita. Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. *Ceramics Silikaty*, vol. 50 (2006), pp. 115–122.
36. BÖRCSÖK, Zoltán ir PÁSZTORY, Zoltán. The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey. *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 79 (2021), nr. 3, pp. 511–526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01637-3>.
37. RAZUMOV, Evgeny; BARCÍK, Štefan; KVIETKOVÁ, Monika ir ROMELEVICH, Khasanshin. Studies on Mechanical Properties of Composite Materials Based on Thermo Modified Timber. *Drvna Industrija*, vol. 64 (2013), pp. 3–6.
38. SAHA, Prosenjit; CHOWDHURY, Sukanya; ROY, Debasis; ADHIKARI, Basudam; KIM, Jin Kuk ir kt. A brief review on the chemical modifications of lignocellulosic fibers for durable engineering composites. *Polymer Bulletin*, vol. 73 (2016), nr. 2, pp. 587–620. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00289-015-1489-y>.
39. WANG, Peihan; XU, Chenyang; LI, Qiuyi; GUO, Yuanxin ir WANG, Liang. Evaluation on the mechanical, thermal insulation and durability properties of wood recycled ecological concrete.

- Materialia, vol. 32 (2023), pp. 101965. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589152923002922>.
40. AWAL, ASM Abdul; MARIYANA, AAK ir HOSSAIN, M. Z. Some aspects of physical and mechanical properties of sawdust concrete. *GEOMATE Journal*, vol. 10 (2016), nr. 21, pp. 1918–1923.
 41. LUO, Mian ir QIAN, Chunxiang. Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength. *Construction and Building Materials*, vol. 121 (2016), pp. 659–663. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816310005>.
 42. PEDREÑO-ROJAS, M. A.; MORALES-CONDE, M.; PÉREZ-GÁLVEZ, F. ir RODRÍGUEZ-LIÑÁN, C. Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste. *Journal of Cleaner Production*, vol. 166 (2017), pp. 690–705. Prieiga per: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029154005&doi=10.1016%2fj.jclepro.2017.08.077&partnerID=40&md5=726a4438c218b66a437f4d4062e5740c>.
 43. SALES, A.; DE SOUZA, F. R.; DOS SANTOS, W. N.; ZIMER, A. M. ir ALMEIDA, F. D. C. R. Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application. *Construction and Building Materials*, vol. 24 (2010), nr. 12, pp. 2446–2453. Prieiga per: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-78049318850&doi=10.1016%2fj.conbuildmat.2010.06.012&partnerID=40&md5=22a1d4b84eca92772c4017384a905db3..>
 44. ÖZKAN, İffet Gamze Mütevelli; ALDEMİR, Kıymet; ALHASAN, Omar; BENLİ, Ahmet; BAYRAKTAR, Oguzhan Yavuz ir kt. Investigation on the sustainable use of different sizes of sawdust aggregates in eco-friendly foam concretes: Physico-mechanical, thermal insulation and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, vol. 438 (2024), pp. 137100. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824022426..>
 45. YAGUBKIN, Aleksandr; SHABANOV, Dmitry; NIYAKOVSKII, Aleksandr ir ROMANOVSKI, Valentin. Maximizing strength and durability in wood concrete (arbolite) via innovative additive control and consumption. *Biomass Conversion and Biorefinery* (2024). Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06071-6..>
 46. KEMPPAINEN, K.; SIIKA-AHO, M.; PATTATHIL, S.; GIOVANDO, S. ir KRUUS, K. Spruce bark as an industrial source of condensed tannins and non-cellulosic sugars. *Industrial Crops and Products*, vol. 52 (2014), pp. 158–168. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092666901300561X..>
 47. ANDREWS, Susan S. ir CARROLL, C. Ronald. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecological Applications*, vol. 11 (2001), nr. 6, pp. 1573–1585.
 48. MOUISSA, Fadhila; BENYAHIA, Azzedine; DJEHICHE, Mokhtar; BELMOKRE, Kamel; DEGHFEL, Nadir ir kt. The effect of chemical treatment on the mechanical and thermal properties of composite materials based on clay reinforced with sawdust. *Matériaux & Techniques*, vol. 109 (2021), nr. 1, pp. 101.
 49. KİÇAITİ, Asta; SKRIPKIŪNAS, Gintautas ir PUNDIENĖ, Ina. The effect of calcium nitrate on the properties of portland cement pastes and concrete hardening at low temperatures (2020).

50. WANG, Yimu; JIA, Jinqing; CAO, Qi ir GAO, Xing. Effect of calcium formate on the compressive strength, and hydration process of cement composite containing fly ash and slag. *Journal of Building Engineering*, vol. 50 (2022), pp. 104133. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222001462>.
51. RAHMAN, Arafater ir KHONDOKER, Mohammad A. Effect of Treatment Methods on Material Properties and Performance of Sawdust-Concrete and Sawdust-Polymer Composites. *Polymers*, vol. 16 (2024), nr. 23.
52. MURAD, Yasmin Zuhair; TARAWNEH, Ahmad; SALEH, Eman F.; MUSMAR, Mazen; ALMASHAQBEH, Ayoub ir kt. Mechanical properties of heat damaged oil shale ash concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 8 (2022), nr. 1, pp. 23. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00995-6>.
53. SLAVICKAS, Andrius; TOHVER, Hando; HOLIUK, Maryna; KRASNIKOVS, Andrejs; MÖTLEP, Riho ir kt. Evaluation of radiation shielding properties of concrete with oil shale ash and basalt-boron fiber additives for spent nuclear fuel casks. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 439 (2025), pp. 114110. Prieiga per: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0029549325002870>.
54. HANŽIČ, Lucija; ŠTEFANČIČ, Mateja; ŠTER, Katarina; ZALAR SERJUN, Vesna; ŠINKA, Māris ir kt. Collision Milling of Oil Shale Ash as Constituent Pretreatment in Concrete 3D Printing. *Infrastructures*, vol. 10 (2025), nr. 1.
55. KONONOVA, Olga; KRASNIKOVS, Andrejs; JAFARLI, Ilgar; NOVAKOVA, Iveta; GULIK, Volodymyr ir kt. Effective Mechanical Properties of a Composite Material Reinforced by Oil Shale Ash Particles. *Applied Sciences*, vol. 15 (2025), nr. 3.
56. ZHANG, Xiangkun; WANG, Wenlong; ZHANG, Yannian ir GU, Xiaowei. Research on hydration characteristics of OSR-GGBFS-FA alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*, vol. 411 (2024), pp. 134321. Prieiga per: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0950061823040394>.
57. ASHTEYAT, Ahmed M.; SMADI, Amani; AL RJOUB, Yousef S. ir KIRGIZ, Mehmet S. 4 - Oil shale ash as hydraulic binder substitution in binder-based material with additive of superplasticizer and roller compaction method In: *Advance Upcycling of By-Products in Binder and Binder-Based Materials*, pp. 67–99 Mehmet Serkan Kırgız. Woodhead Publishing, 2024. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323907910000147>.
58. ASHTEYAT, Ahmed M.; AL RJOUB, Yousef S.; OBAIDAT, Ala' Taleb; KIRGIZ, Mehmet; ABDEL-JABER, Mu ir kt. Roller Compacted Concrete with Oil Shale Ash as a Replacement of Cement: Mechanical and Durability Behavior. *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 17 (2024), nr. 1, pp. 151–168. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00225-3>.
59. QIAN, Lan-Ping; XU, Ling-Yu; HUANG, Bo-Tao ir DAI, Jian-Guo. Pelletization and properties of artificial lightweight geopolymer aggregates (GPA): One-part vs. two-part geopolymer techniques. *Journal of Cleaner Production*, vol. 374 (2022), pp. 133933. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0959652622035053>.
60. CHINNU, S. N.; MINNU, S. N.; BAHURUDEEN, A. ir SENTHILKUMAR, R. Recycling of industrial and agricultural wastes as alternative coarse aggregates: A step towards cleaner production of concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 287 (2021), pp. 123056. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0950061821008163>.

61. PETRILLO, Antonella; COLANGELO, Francesco; FARINA, Ilenia; TRAVAGLIONI, Marta; SALZANO, Cinzia ir kt. Multi-criteria analysis for Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of lightweight artificial aggregates from industrial waste by double-step cold bonding palletization. *Journal of Cleaner Production*, vol. 351 (2022), pp. 131395. Prieiga per: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0959652622010198>.
62. GRINYS Audrius, AUGONIS Algirdas, DAUKŠYS Mindaugas, PUPEIKIS Darius. Mechanical properties and durability of rubberized and SBR latex modified rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 248 (2020), pp. 118584. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118584>.