



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Plastiko atliekų panaudojimo kuriant statybos produktus tyrimai

Magistro baigiamasis projektas

Agnė Barkauskaitė
Projekto autorė

Prof. Vitoldas Vaitkevičius
Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Plastiko atliekų panaudojimo kuriant statybos produktus tyrimai

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

Agnė Barkauskaitė
Projekto autorė

Prof. Vitoldas Vaitkevičius
Vadovas

Doc. Gediminas Stelmokaitis
Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Agnė Barkauskaitė

Plastiko atliekų panaudojimo kuriant statybos produktus tyrimai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Agnė Barkauskaitė

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):
PLASTIKO ATLIEKŲ PANAUDOJIMAS KURIANT STATYBOS PRODUKTUS

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

(lietuvių k.): **PLASTIKO ATLIEKŲ PANAUDOJIMAS KURIANT STATYBOS PRODUKTUS
TYRIMAI**

(anglų k.):
**RESEARCH ON THE USE OF PLASTIC WASTE IN THE CREATION OF CONSTRUCTION
PRODUCTS**

Pradiniai duomenys darbui:

-

Baigiamojo projekto dalys:	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	x
Analitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Skaitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį):

Vadovas: Dr. Vitoldas Vaitkevičius
(indėlis 100 %) *pareigos, vardas, pavardė*
Patvirtinta elektroniniu būdu

Konsultantas: _____
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas: _____
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Studentas: Agnė Barkauskaitė
vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu

Barkauskaitė, Agnė. Plastiko atliekų panaudojimo kuriant statybos produktus tyrimai

Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptių grupė: inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: plastiko atliekos, ekologiškas betonas, plastikas betone.

Kaunas, 2024. 51 p.

Santrauka

Magistro baigiamojo darbo tikslas yra iš plastiko atliekų sukurti plastiko granules ir jomis pakeisti stambų betono užpildą, taip sukuriant ekologišką bei patvarų betoną, ir pagaminti statybos produktą, blokelį, iš šio betono.

Pirmoje baigiamojo darbo dalyje atliekama literatūros analizė, išsiaiškinamos plastiko atliekų problemos gamtai bei žmogui, aptariamos skirtingos plastiko atliekų rūšys bei galimi skirtingi plastiko atliekų panaudojimo būdai kuriant statybos medžiagas bei produktus.

Eksperimentinėje dalyje aptarti tyrimo tikslas ir uždaviniai, aprašytos tyrime naudotos medžiagos bei tyrimo bandiniai.

Tyrimo metodologijos dalyje sukuriama skirtingų sudėčių plastiko granulės, nustatomos jų suirimo jėgos, parenkamas racionaliausias plastiko granulių variantas betono gamybai. Gaminamas betonas su plastiko granulėmis, jo sudėtis tobulinama, siekiant gauti kuo stipresnę bei ekologiškesnę betoninį gaminį. Parenkama racionaliausia betono sudėtis blokelių gamybai

Taip pat, atliekamas vandens įgeriamumo skaičiavimas bei atsparumo šalčiui prognozavimas, atliekami atsparumo šalčiui bandymai.

Barkauskaitė, Agnė. Research on the Use of Plastic Waste in the Creation of Construction Products. Master's Final Degree / supervisor prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field group: Engineering Sciences.

Keywords: plastic waste, green concrete, plastic in concrete.

Kaunas, 2024. 51 p.

Summary

The aim of this master's thesis is to create plastic granules from plastic waste, replace coarse aggregate with these granules and create environmentally friendly and durable concrete product, ablock, out of this concrete.

In the first part of this thesis, analysis of the literature is performed, problems of plastic waste for nature and human are elucidated, different types of plastic waste and possible ways of using plastic waste in creating different building materials and products are discussed.

The experimental part explains the purpose and tasks of investigation, describes materials and samples used in the investigation.

In research methodology, plastic granules of different compositions are created, forces, to which granules disintegrates are determined and the most rational composition's granules are selected for concrete production. Concrete with rational plastic granules are product, its composition is being improve in order to obtain the most environmentally friendly strongest possible concrete. The most rational composition of concrete is selected for production of concrete block.

Also, the calculation of water absorption and the prediction of resistance to freezing and resistant to freezing test were carried out.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga	12
1.1. Plastiko atliekų perdirbimas	12
1.1.1. Mechaninis perdirbimas	12
1.1.2. Cheminis perdirbimas.....	13
1.2. Perdirbamo plastiko panaudojimas kuriant statybos produktus	14
1.2.1. Perdirbamo plastiko rūšys	14
1.2.2. Perdirbamas plastikas statybos sektoriuje	14
1.3. Perdirbo plastiko panaudojimas betone.....	15
1.3.1. Lengvasis „žaliasis“ betonas	16
1.3.2. Perdirbto plastiko panaudojimas kaip dalinio užpildo	17
1.3.3. Perdirbto plastiko panaudojimas kaip armuojančiojo pluošto.....	18
1.3.4. Eksploatacinės savybės	18
1.4. Lydytas plastikas	19
1.4.1. Naudotos medžiagos.....	19
1.4.2. Smulkiagrūdis betono mišinys su išlydytu plastikumu	19
1.4.3. Mechaninės ir fizikinės savybės	20
2. Eksperimentinė dalis	23
2.1. Darbo tikslas ir uždaviniai.....	23
2.2. Tyrime naudotos medžiagos	23
2.3. Tyrimo eiga	25
3. Tyrimo metodai	27
3.1. Užpildų gamyba.....	29
3.1.1. Užpildų stiprumo nustatymas	30
3.2. Betono su plastiko atliekomis gamyba	33
3.2.1. Betono gniuždomojo stiprio nustatymas	35
3.3. Betono su plastiko užpildais, žvirgždu ir keramzitu palyginimas	38
3.3.1. Betono su plastiko užpildais, žvirgždu ir keramzitu gamyba.....	38
3.3.2. Betono su plastiko užpildais, žvirgždu ir keramzitu gniuždomojo stiprio nustatymas	38
3.4. Vandens įgeriamumas, atsparumo šalčiui prognozavimas	40
3.5. Atsparumo šalčiui nustatymas	43
3.6. Betoninio blokelių gamyba.....	43
Išvados	45
Literatūros sąrašas	46

Lentelių sąrašas

1.1.2.1 lentelė. Įvairių cheminių perdirbimo metodų santrauka [11].....	13
1.3.1.2.1 lentelė. Plastikų ir natūralių išteklių sąrašas [42].....	17
1.3.4.1 lentelė. Statybinių medžiagų, pagamintų su skirtingais plastiko užpildų santykiais, tankio pokytis [50].....	18
1.4.2.1 lentelė. Mišinio su lydytomis plastiko atliekomis santykis ir kietėjimo laikas.....	20
2.3.2.1 lentelė. Betono sudėtis	25
3.1.1 lentelė. I užpildų variantas	29
3.2.1 lentelė. I betono sudėtis 1m ³	34
3.3.2 lentelė. II betono sudėtis 1m ³	34
3.4.3 lentelė. III betono sudėtis 1m ³	34
3.5.1.1 lentelė. Betoninių bandinių svoris ir matmenys.....	35
3.6.1.2 lentelė. Betoninių bandinių gniuždomasis stipris	36
3.7.1.3 lentelė. Skirtingų betono variantų vidurkių gniuždomojo stiprio rezultatų lentelė.....	37
8.3.3.1. lentelė. Betono su plastiko granulėmis, žvirgždu ir keramzitu sudėtys	38
9.3.2.3 lentelė. Betoninių bandinių svoris ir matmenys.....	38
3.3.10.2 lentelė. Betoninių bandinių su plastiko granulėmis, žvirgždu ir keramzitu gniuždomasis stipris	39
3.3.11.3 lentelė. Betonų su plastiko granulėmis, žvirgždu ir keramzitu vidurkių gniuždomojo stiprio rezultatai	39
3.4.12 lentelė. Vandens įgeriamumo skaičiavimo rezultatai.....	40
3.6.13 lentelė. Betono su plastiko granulėmis sudėtis	43

Paveikslų sąrašas

2.3.2.1 pav. Betoninių bandinių su plastiko atliekomis gniuždomojo stiprio rezultatų diagrama	26
3.1 pav. Tyrimo srauto diagrama	27
3.2 pav. Tyrimų eiga ir metodai	28
3.3.1.1 pav. „Toni Technik“ stiprio nustatymo prietaisas	30
3.4.1.2 pav. Užpildų su I sudėtimi stiprio nustatymo grafiniai rezultatai	31
3.5.1.3 pav. Užpildų su II sudėtimi suirimo jėgos nustatymo grafiniai rezultatai	32
3.6.1.4 pav. Užpildų su III sudėtimi suirimo jėgos nustatymo grafiniai rezultatai	32
3.7.1.5 pav. Užpildų skirting variantų ardančiųjų jėgų vidurkių grafiniai rezultatai	33
3.8.1 pav. Betono maišymo procesas maišyklėje	35
3.9.1.1 pav. Skirtingų betono variantų vidurkių gniuždomojo stiprio grafiniai rezultatai	37
3.3.10.1 pav. Betonų su plastiko granulėmis, žvirgždu ir keramzitu vidurkių gniuždomojo stiprio rezultatai	39
3.5.11 pav. Betoniniai bandiniai su žvirgždu, keramzitu, plastiko granulėmis ir grynu plastiko po šildymo/šaldymo ciklą	43
3.6.12 pav. Betoninis blokelis su grynomis plastiko atliekomis	44
3.6.13 pav. Betoninis blokelis su plastiko granulėmis	44

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

PVC – polivinilchloridas;

PV – polikarbonatas;

PP – polipropilenas;

PET – polietileno tereftalatas;

HDPE – didelio tankio polietilenas;

LDPE – mažo tankio polietilenas;

PLA – polilaktidas;

PS – polistirolis;

LPD – mažo tankio plastikas;

PE – polietilenas;

v/c – vandens ir cemento.

Įvadas

Nuolatinė plėtra pramonės ir technologijų srityje sugeneruoja didelius kiekius atliekų, kurios yra išmetamos į sąvartynus, sukeldamos aplinkos taršą ir visuomenės sveikatos problemas [1]. Didžioji dalis šių atliekų išlieka aplinkoje šimtus ar net tūkstančius metų [2]. Todėl visos atliekos turėtų būti pašalinamos arba perdirbamos, tam, kad būtų galima iš anksto apsaugoti gamtą. Vienas iš veiksmingiausių būdų, taikomų sprendžiant su kietosiomis atliekomis susijusias problemas, yra žiedinės ekonomikos pritaikymas – atliekų perdirbimas ir panaudojimas antrą kartą. Šį metodą galima taikyti ieškant būdų kaip panaudoti plastiko atliekas kuriant statybos produktus.

Plastikas yra naudojamas beveik visose gyvenimo srityse. Jo naudojimas paplitęs dėl universalumo bei žemos kainos. Apskaičiuota, kad 2014 metais bendras visame pasaulyje pagaminto plastiko kiekis siekė 313 milijonų tonų, 2015 metais padidėjo iki 322 milijonų tonų, o tai yra net 3% padidėjimas [3]. Remiantis „Plastics Industry Association“ duomenimis, plastiko suvartojimas Europoje 2014 metais siekė 59 milijonus tonų ir tik 25,8 tūkstančio tonų buvo šalinamos kaip atliekos [4, 5]. Šiomis dienomis dauguma plastikinių gaminių ir prekių (tokių kaip maisto pakuotės ir kt.) yra išmetami iš karto po jų panaudojimo, todėl ir susidaro dideli kiekiai plastiko atliekų. Taip pat, dauguma plastiko rūšių nėra biologiškai skaidomos ir chemiškai neaktyvios, todėl šie polimeriniai produktai gali išlikti dešimtmečius ar net šimtmečius. Kai kurios plastiko rūšys – polivinilchloridas (PVC) ir polikarbonatas (PV) – gali iš lėto išskirti toksiškus junginius, tokius kaip ftalatas, metalai, dioksinas, į orą, vandenį ar dirvožemį [6, 7]. Dėl šios priežasties, plastiko atliekų tvarkymas sukelia svarbias aplinkosaugos problemas bei pavojų sveikatai. Ateityje šios rūšies atliekų susidarymas tik didės. Apskaičiuota, kad vidutiniškai kas 10 metų plastiko atliekų skaičius padvigubėja [8].

Šiame magistro baigiamajame darbe atlikta plastiko atliekų ir jų panaudojimo literatūros analizė, atliktas tyrimas, kurio metu kuriamos granulės iš plastiko atliekų ir kitų medžiagų, granulės panaudojamos betono gamyboje kaip dalinis užpildas.

Tikslas:

Panaudojant plastiko atliekas, sukurti statybos produktą – betoninį blokelį.

Uždaviniai:

Atlikti literatūros analizę apie plastiką bei plastiko panaudojimą statybos sektoriuje;

Pagaminti kelis skirtingus plastiko granulių variantus, nustatyti stiprį gniuždant;

Parinkti racionaliausią plastiko granulių variantą;

Pagaminti betoninius bandinius su skirtingomis betono sudėtimis, naudojant plastiko granules, nustatyti bandinių stiprį gniuždant;

Parinkti optimaliausią betono sudėtį blokelių gamybai;

Nustatyti betono su plastiko atliekomis atsparumą šalčio poveikiui;

Pagaminti betoninį blokelį su plastiko atliekų granulėmis.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Plastiko atliekų perdirbimas

Kasmet į vandenyną patenka apie 14 milijonų tonų plastiko (daugiausia iš vietovių, esančių Azijos pakrantėse). Maždaug 700 vandens gyvūnų rūšių išnyko per daugelį metų dėl plastiko taršos. Buvo nustatyta, kad dauguma plastiko likučių, patekusių į regionus šalia vandenynų, turi kenksmingų virusų, dumblių ir mikrobu, kurie lengvai perneša nuodingas medžiagas, kurios galiausiai gali sukelti ekosistemos pokyčius. Jei nebus imtasi prevencinių priemonių, yra tikimybė, kad iki 2040 metų plastiko atliekų skaičius išaugus iki 30 milijonų tonų per metus ir tai turės labai didelę įtaką mus supančios aplinkos poveikiui [9]. Todėl plastiko atliekų tvarkymas yra labai svarbus, siekiant išvengti neapsakomai didelio šių atliekų kiekio.

Panaudotas plastikas gali būti tvarkomas šiais būdais: užpilant žeme, deginant, panaudojant pakartotinai. Užpylimas žeme yra galutinis pasirinkimas tvarkant plastiko atliekas. Šis būdas reikalauja didžiulio žemės kiekio bei sukelia ilgalaikes taršos problemas.

Kai kuriose šalyse plastiko atliekos tvarkomos jas deginant – panaudojama plastiko šilumos energijos vertė ir taip atliekos visiškai pašalinamos. Šis atliekų šalinimo būdas yra žalingas gamtai bei žmonių sveikatai.

Pakartotinis panaudojimas yra geriausias sprendimas tvarkant plastiko atliekas. Perdirbimas sumažina energijos sąnaudas, taip išsaugomi gamtiniai išteklių, mažinama aplinkos tarša. Plastiko perdirbimas atliekamas taikant vieną iš žemiau išvardytų būdų:

1.1.1. Mechaninis perdirbimas

Mechaninis perdirbimas – tai plastiko atliekų atkūrimas naudojant mechaninius procesus, tokius kaip rūšiavimas, plovimas, džiovinimas, šlifavimas. Mechaninis perdirbimas nepakeičia plastiko cheminės sudėties, todėl naudojant šį būdą polimerines medžiagas galima panaudoti pakartotinai bei perdirbi daugybę kartų [10].

Mechaninio perdirbimo etapai susideda iš atliekų surinkimo, jų rūšiavimo, plovimo, džiovinimo, ir, galiausiai, plastiko gaminio suformavimo. Šie etapai priklauso nuo atliekų struktūros ir sudėties. Jie gali būti atliekami kitokia tvarka arba gali būti kartojami kelis kartus, kad būtų užtikrintas tinkamas plastiko atliekų apdorojimo procesas.

Visi termoplastikai, kurių eksploatavimo laikas baigiasi, gali būti perdirbami mechaniškai, ribojant jų kokybės pablogėjimą – taikant atitinkamą strategiją. Tam, kad plastikas galėtų būti perdirbamas, pirmiausia, jis turi būti rūšiuojamas pagal medžiagos tipą. Pirminis plastiko rūšiavimas gali būti atliekamas rankiniu arba mechaniniu būdu. Rankinis būdas yra sudėtingesnis, užtrunka ilgesnį laiką. Mechaninis perdirbimas yra plačiausiai naudojamas perdirbimo būdas pirminėms (pramoninėms) ir antrinėms (po pirkėjo likusioms) plastiko atliekoms perdirbti Europoje. Šis būdas naudojamas ir polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET) atliekoms šalinti.

Utilizuotų medžiagų kokybė priklauso nuo plastiko atliekų srauto kokybės. Plastikui eksploatacijos metu ir perdirbant patiria fizikinių ir cheminių pokyčių (pvz. oksidacijos reakcijas). Plastiko atliekų srautas, iš kurio gaunamas vienos rūšies plastikas, yra tinkamiausias mechaniniam perdirbimui. Mišrūs plastiko atliekų srautai yra nemažas iššūkis naudojant šį perdirbimo būdą – plastikus reikia papildomai plauti ir rūšiuoti norint pašalinti nereikalingas priemaišas ir teršalus. Šio proceso metu susidaro dideli kiekiai nevalytų nuotekų, kuriuose gali būti ir didelis mikroplastiko kiekis, dėl ko gali kilti pavojus vandens ekosistemoms. Kiek yra žinoma, literatūroje nėra ataskaitų apie mikroplastiko susidarymą ir išsiskyrimą mechaninio perdirbimo metu. Tačiau mechaninis plastiko perdirbimas yra

vienas iš ekonomiškiausių bei aplinką tausojančių būdų atliekų šalinimui, taip pat, panaudoto plastiko surinkimo, transportavimo ir perdirbimo procesų poveikis aplinkai yra mažesnis lyginant su naujo plastiko gamyba.

1.1.2. Cheminis perdirbimas

Daugelis plastiko gaminių yra sudaryti iš kelių tipų polimerų, kelių plastiko sluoksnių arba yra užteršti maisto likučiais bei kitais nešvarumas. Dėl šių priežasčių, yra sunku arba per brangu tokias plastiko atliekas perdirbti mechaniniu būdu, todėl šios atliekos yra deginamos arba vežamos į sąvartynus.

Tam, kad išvengtų atliekų deginimo ir kaupimo sąvartynuose, tokio tipo atliekoms gali būti naudojamas cheminio perdirbimo būdas– šio proceso metu plastiko atliekos yra suskaidomos iki molekulinę dalelių. Kai plastikas taip suskaidomas į daleles, jas galima atkurti iki pirminių žaliavų ir perdirbti į naujus polimerus. Cheminis perdirbimas gali būti skirstomas į 3 technologijas [11].

Tirpinant pašalinami priedai iš polimerų, panardinant juos į tirpiklį. Tuomet polimerai gali būti performuojami į naujus perdirbtus plastikus (salvolizė).

Depolimerizacijos procese naudojamos cheminės medžiagos, tirpikliai ir aukšta temperatūra, taip polimerai atverčiami į smulkias molekules (monomeras), kurios vėliau grąžinamos į plastiko gamybos procesą kaip antrinės žaliavos.

Perdirbimo metu taip pat naudojamos cheminės medžiagos, aukšta temperatūra ar kataliziniai procesai, tam, kad plastiko atliekos būtų suskaidytos į dujines (dujinimas) arba skystas (pirolizė) medžiagas.

Dujinimo proceso metu atliekos kaitinamos iki labai aukštos temperatūros (maždaug 1000 °C-1500 °C) mažai deguonies turinčioje aplinkoje. Deguonis suskaido molekules iki paprasčiausių komponentų. Susidariusios sintetinės dujos (vandenilio, anglies monoksido ir šiek tiek anglies dioksido) naudojamos įvairių cheminių medžiagų gamybai (tokių kaip metanolis, amoniakas, angliavandeniai, acto rūgštis), reikalingų gaminant plastiką bei degalus ar trąšas.

Pirolizės proceso (terminio krekingo) metu plastiko atliekos kaitinamos iki aukštesnės nei 400 °C temperatūros, mažai deguonies turinčioje aplinkoje. Šio proceso metu, ilgos polimerų grandinės suskaidomos į daugybę angliavandenių (dujas, dyzeliną, naftą), kurios gali būti tiekiamos į naftos chemijos gamyklas, kur vėl būtų paverčiamos į polipropileną, polietileną arba būtų tiesiogiai naudojamos kaip kuras.

1.1.2.1 lentelėje apibendrinama pagrindinė informacija apie šias 3 perdirbimo technologijas.

1.1.2.1 lentelė. Įvairių cheminių perdirbimo metodų santrauka [11]

Perdirbimo technologija	Proceso aprašymas	Polimerų tipai	Privalumai	Iššūkiai
Solvolizė	Ištirpusios medžiagos skilimas, susidarant naujai medžiagai, kai vyksta medžiagos ir tirpiklio mainų reakcija.	PET PLA PC	<ul style="list-style-type: none"> Efektyvu; Lengvai suvaldoma; 	<ol style="list-style-type: none"> Užtrunka daug laiko kol įvyksta depolimerizacija; Negali apdoroti didelio kiekio priedų; Sunku atskirti žaliavų priemaišas;
Pirolizė	Medžiagos suskaidymas veikiant šilumai be deguonies.	Visi plastikai	<ul style="list-style-type: none"> Nuodingos dujos nėra išleidžiamos į aplinką; Gaminama elektra ir šiluma; Platus kietų, skystų ir dujinių produktų pasiskirstymas. 	<ol style="list-style-type: none"> Sudėtinga chemija; Reikalauja, kad didelės apimtyt būtų rentabilios; Heteroatomai sumažina produktų kokybę.

1.1.2.1 lentelės tęsinys

Perdirbimo technologija	Proceso aprašymas	Polimerų tipai	• Privalumai	Iššūkiai
Dujifikacija	Dalinis oksidacijos procesas, (naudojant orą arba garus) paverčiant plastiko atliekas į dujas.	Visi plastikai	<ul style="list-style-type: none">• Polimerų atskyrimas į skirtingas kategorijas nėra būtinas;• Gaminama elektra ir šiluma;• Kaitinama iki depolimerizacijos.	<ol style="list-style-type: none">1. Išskiria nuodingas dujas;2. Mišrių plastiko atliekų dujinimo technologijų trūkumas;3. Negali būti naudojama monomerų gamyboje;4. Susidaro derva.

1.2. Perdirbamo plastiko panaudojimas kuriant statybos produktus

1.2.1. Perdirbamo plastiko rūšys

Plastikai yra skirstomi į termoplastikus ir termoreaktyvius plastikus. Termoplastikai – tai tokie plastikai, kurie pakeičia savo fizikinę formą į skystą veikiant aukštos temperatūros ir sukietėja temperatūrai sumažėjus. Termoplastikai, tokie kaip polietileno tereftelatas (PET), mažo tankio polietilenas (LDPE), didelio tankio polietilenas (HDPE), polistirenas (PS) ir polipropilenas (PP) yra perdirbami. Termoreaktyvūs plastikai, kuriuose yra fenolio ir epoksidinių dervų, yra neperdirbami.

1.2.2. Perdirbamas plastikas statybos sektoriuje

Plastiko atliekos gali būti naudojamos statant pastatus bei kuriant statybos produktus. Kamaruddin [13] teigia, kad toks plastiko atliekų panaudojimas yra aplinkai saugesnis atliekų tvarkymo būdas.

Plastiko atliekų panaudojimas gaminant blokelių, plyteles bei plytas

Gaminant blokelių, plyteles ir plytas buvo naudojamos įvairios plastiko atliekos. Plastiką naudojamas kartu su kitomis statybinėmis medžiagomis, tokiomis kaip smėlis, perdirbtas stiklas, molingas smėlis, po statybų ir griovimo darbų likusiosiomis atliekomis tam tikru santykiu, siekiant pagerinti galutinio produkto stiprumą [14]. Taip pat, gaminant įvairius statybos produktus, gali būti naudojamas tik plastikas.

Remiantis tam tikrais veiksniais, tokiais kaip šilumos laidumas, tempimas, patvarumas, savasis svoris bei garso izoliacija, produkto kokybė lyginama su įprastais produktais, kuriuose nėra plastiko atliekų. Pastebima, kad pridėjus plastiką kaip sudedamąją blokelių, plytelių ar plytų dalį, gaunamas didesnis gniuždymo stipris ir sumažėjęs šilumos laidumas, todėl tokie produktai yra tinkami naudoti statybos sektoriuje. Nustatyta, kad plytos, pagamintos naudojant plastiko atliekas, yra patvarios bei tvirtos, todėl toks plastiko atliekų tvarkymo būdas yra tinkamesnis nei jų šalinimas [12].

Plastiko atliekų panaudojimas kelių įrengime

Kelių tiesyboje plastiko atliekos yra naudojamos kaip dalinis ar visiškai betono mišinio natūralaus rišiklio pakaitalas. Šios atliekos taip pat naudojamos kaip užpildai asfalte ir bitume [12]. Toks plastiko atliekų panaudojimas yra labiau paplitęs kelių ir gatvių įrengime, kur tokios atliekos pagerina konstrukcijos laikomąją galią, standumą ir šlytį [14]. Nors tiesiant kelius plastiko eksploatacinės savybės yra priimtinos dėl šios medžiagos atsparumo modulio, standumo ir laikomosios galios, plastiko fizikinės savybės, pvz. lygus paviršius, sumažina kelių konstrukcijos pajėgumą, lyginant su įprastomis kelių įrengimo medžiagomis. Plastiko atliekų panaudojimas įrenginėjant kelius pagerina

kelių dangos kokybę ir prailgino eksploatacijos laiką bei pagerino tūrinės ir mechaninės kelių tiesimo mišinių savybes [12].

Kiti plastiko atliekų statybos sektoriuje panaudojimo būdai

Plastiko atliekos naudojamos ir kaip medienos pakaitalas gaminant duris, izoliacines medžiagas. Perdirbtas sumaišytas plastikas gali būti pjaustomas ar kalamas. Jis yra toks pat patvarus kaip ir mediena ir tinkamas naudoti tvorų, suolų, laivų dokų gamybai [15]. Plastiko atliekų milteliai arba granulės gali būti maišomos su medžio pjuvenomis ar celiuliozės pluoštu, norint pagaminti ekologiškas duris [16]. Nėra atlikta daug tyrimų šioje srityje, todėl nėra aiškiai žinoma, kokią įtaką daro plastikas, naudojamas kartu su medžiu [17]. PS atliekos gali būti naudojamos izoliacinių medžiagų gamyboje, taip sukuriant aplinkai saugesnes medžiagas. Taip pat, PVC (bei pjaustymo metu likusios) atliekos gali būti panaudojamos gaminant PS. Tokių atliekų naudojimas ne tik saugo gamtą, bet ir mažina izoliacinių medžiagų gamybos kiekius [18]. Tačiau plastiko atliekų naudojimas izoliaciniuose gaminiuose yra ribotas dėl šių medžiagų mažo tankio ir degumo. Perdirbtą plastiką šildant, lydant ir presuojant galima suformuoti blokus, kuriais galima pakeisti įprastas medines ar mūrines pertvarines sienas.

1.3. Perdirbo plastiko panaudojimas betone

Betonas yra daugiausiai naudojama statybinė medžiaga pasaulyje [19]. Jis gaminamas iš cemento, užpildų (stambių ir smulkių), vandens ir yra stipresnis ir patvaresnis lyginant su kitomis statybinėmis medžiagomis.

Kaip užpildai ar rišikliai, plastiko atliekos yra cementinių kompozitų sudedamosios dalys, sumaišytos su kitomis atliekomis [12]. Šios atliekos gali būti ryžių lukštų pelenai, silicio dioksido dūmai, perdirbtas betonas ar lakieji pelenai. Mechanškai perdirbti plastikai, sumaišyti su šiomis medžiagomis, pasižymi dideliu stabilumu ir kietumu, todėl yra tinkamos cementinių kompozitų žaliavos. Galutiniai produktai yra blokėliai, plytos, plytelės ir kelių įrengimui naudojamos medžiagos, tokios kaip užpildai ir bitumas. Naudojant plastiko atliekas kaip užpildus ar rišiklius, jų cheminė sudėtis nėra svarbi, nes hidratacijos procesai nesikeičia. Plastikais, naudojami cementiniams kompozitams gaminti, yra dervos, PLA, PVC, PS, PET, HDPE, PP ir LPD, kur jie atlieka dvi funkcijas. Jie gali pakeisti natūralius užpildus arba sustiprinti betoną per jų pluoštus. Cementinių kompozitų gamybos metodika įprasta ir apima natūralių smulkių ir šiurkščių užpildų pakeitimą tokio pačio tūrio ir masės plastikais.

Naudojant plastiko atliekas kuriant statybos produktus turi būti tenkinamos numatomos naudojimo tvirtumo ir atsparumo savybės. Plastiko atliekos turėtų būti pelningos ir perspektyvios, lyginant su kitomis medžiagomis, kad būtų plačiai naudojamas statybos pramonėje. Betono produktams gaminti, šiuo metu, plastiko atliekos yra naudojamos dvejose pagrindinėse srityse: kaip plastiko užpildai ir pluoštai (naudojamas įvairių rūšių plastikas). Šių atliekų savybės priklauso nuo taikomo perdirbimo būdo – ar tai perdirbimas lydant, ar mechaninis perdirbimas. Mechaninis perdirbimo būdas yra ekonomiškai efektyvesnis būdas gauti plastiko užpildus bei pluoštus, tačiau lydymo proceso metu gaunamos vienodesnių matmenų ir savybių sudedamosios dalys.

Lyginant su įprastomis natūraliomis rišamosiomis medžiagomis, plastiko užpildų ir pluoštų tankis yra daug mažesnis. Dėl šios priežasties jis gali būti naudojamas lengvojo betono gamybai. Manoma, kad tuštumos tarp plastiko užpildų dalelių lemia mažesnę tūrinę tankį. Kai kuriuose tyrimuose yra siūloma išlydytą plastiko užpildą maišyti su natūraliais rišikliais, siekiant pagerinti sukibimo savybes.

Taip pat, jau atliktuose tyrimuose yra siūloma plastiko užpildus padengti hidrofiliu sluoksniu, siekiant išvengti betono atsiskyrimo.

1.3.1. Lengvasis „žalioji“ betonas

Lengvasis betonas apibūdinamas kaip bet kokio tipo betonas, kurio tankis mažesnis nei 2000 kg/m^3 [20]. Jis turi tokių privalumų kaip didelis stiprumo ir svorio santykis, geros šiluminės bei garso izoliacinės savybės. Naudojant lengvąjį betoną sumažinamas naudojamų medžiagų kiekis, statybos laikas, transportavimo sąnaudos bei sunaudojamos energijos kiekis [20, 21, 22, 23, 24]. Dėl šių išvardytų priežasčių lengvojo betono paklausa yra labai didelė.

Lengvasis betonas gali būti gaminamas iš natūralių, pavyzdžiui, vulkaninių ar organinių užpildų. Šie užpildai išgaunami ar surenkami iš gamtos ir naudojami kaip betonų sudedamoji dalis [21].

Vulkaniniai užpildai (pvz. pemza ir skorija) naudojami natūraliai išgauta forma. Literatūroje aprašoma, kad betonas, kuriam pagaminti buvo naudojama pemza, pasiekia 25 MPa gniuždymo stiprį ir turi mažą šilumos laidumą dėl oro, esančio tuštumose [25, 26, 27]. Tačiau toks betonas turi ir trūkumų – jis nėra toks patvarus kaip normalus betonas, didelės kasybos ir gabenimo išlaidos, per dideli betono susitraukimai džiūnant bei didelis vandens sugeriamumas [28, 29].

Organiniai užpildai, panašiai kaip ir vulkaniniai, naudojami kaip visiškai ar daliniai užpildai gaminant betonus. Organiniai užpildai laikomi pigiomis statybinėmis medžiagomis, gali būti naudojami palmių, kokosų kevalai, datulių sėklos, kukurūzų burbuolės [30, 31].

„Žalioji“ betonas su sintetiniais užpildais

Dauguma sintetinių užpildų susidaro iš natūralių medžiagų (pvz. molio, skalūno) arba iš šalutinių produktų (pvz. lakiųjų pelenų, šlako, dumblo) [20, 21]. Taip pat, šių agregatų fizikinėms savybėms įtakos turi ne tik naudojamos medžiagos tipas, bet ir procesas, kurių metu šios medžiagos susidaro [21]. Sintetiniai užpildai išgaunami iš natūralių medžiagų, tokių kaip perlitas, vermikulitas, keramzitas, skalūnas. Šių medžiagų gamybos procesai yra panašūs – žaliava yra veikama aukštos temperatūros, po to ji vėsta ir plečiasi ir, galiausiai, seka smulkinimas arba malimas. Temperatūra ir apdorojimo laikas priklauso nuo žaliavos bei gamybos technikos. Literatūroje pateikta duomenų, kad šių užpildų vienetinis svoris ir vandens sugeriamumas svyruoja tarp $190\text{--}931 \text{ kg/m}^3$ ir tarp 6–26 % [20, 21, 32]. Lengvas betonas pagamintas iš perlito ir vermikulito, pasižymi labai mažu tankiu ($500\text{--}700 \text{ kg/m}^3$), mažu gniuždymo stipriu ($\leq 3 \text{ MPa}$).

Susmulkinto plastiko panaudojimas „žaliajame“ lengvajame betone

Įvairių rūšių plastikai buvo naudojami tiesiogiai betone kaip stambiųjų ar smulkiųjų užpildų pakaitalas. Plastiko tankis yra mažesnis nei natūralių užpildų, todėl plastikas labiau tinkamas lengvojo betono gamybai. Plastiką yra susmulkinamas iki plastiko atliekų, todėl šis procesas apima daugybę kitų procesų – rūšiavimą, plovimą, džiovinimą bei smulkinimą ar malimą. Skirtingi autoriai naudojo susmulkintus PET butelius kaip smulkaus užpildo pakaitalą įvairiais kiekiais (nuo 5 % iki 75 %) [33, 34, 35]. Tačiau yra atlikta ir tokių tyrimų, kai susmulkintas PET plastikas buvo naudojamas ir kaip smulkaus užpildo, ir kaip stambaus užpildo pakaitalas nuo 5 % iki 16 % [36, 37].

Taip pat, surinktas skirtingų rūšių plastikas buvo apdorotas ir panaudotas kaip stambiųjų ar smulkiųjų užpildų dalinis pakaitalas, pakeičiant įvairiomis procentinėmis dalimis – nuo 10 % iki 20 % [38, 39]. Plastiko savybės skiriasi priklausomai nuo rūšies ir apdirbimo būdo. Pavyzdžiui, didžiausią vienetinį svorį pasiekė PET (660 kg/m^3), mažiausią – EPS (8 kg/m^3). Atliktų tyrimų duomenimis, didžiausias vandens sugeriamumas gautas naudojant etileno vinilacetatą (EVA) – 44 %.

1.3.2. Perdirbto plastiko panaudojimas kaip dalinio užpildo

Plastikas statybos pramonėje gali būti naudojamas gaminant bei kuriant įvairius statybinius gaminius, vienas iš šios medžiagos panaudojimo būdų – panaudojimas kaip užpildo. Kitaip tariant, dalį natūralių betono užpildų pakeisti plastiko atliekomis. Šios atliekos gali pakeisti tiek stambius užpildus, tiek smulkius užpildus.

Natūralių užpildų pakeitimas lengvesnėmis medžiagomis sumažintų betono svorį. Statybinių produktų svorio mažinimas yra vienas esminių statybos pramonės tikslų. Lengvas betonas turi daug privalumų, tokių kaip gera pastato šilumos izoliacija, mažesnė kaina bei išlaidų mažinimas tiek statybos produktų kainos atžvilgiu, tiek laiko gamybai [40]. Taip pat, yra žinoma, kad žemės drebėjimai priklauso nuo statinių svorio, todėl žemės drebėjimo tikimybė sumažėja, kai ir pastato svoris mažesnis [41].

Plastiko atliekų panaudojimas kuriant gaminius iš betono yra naudingas aplinkai, tačiau plastiko užpildai neabėjotinai skiriasi nuo natūralių užpildų (1.3.2.1 lent.). Be to, naudojamų perdirbto plastiko atliekų produktyvumą iš dalie lemia, ir tai, kokiais būdais buvo perdirbtas plastikas.

1.3.1.2.1 lentelė. Plastikų ir natūralių išteklių sąrašas [42]

Medžiaga	Tankis (kg/m ³)	Vandens įgeriamumas per 24 val. (%)	Savasis svoris (g/cm ³)	Elastingumo modulis (GPa)	Tempiamasis stipris (MPa)	Šilumos laidumas (W/mK)
PET	438.2	0,09	1,34	2,1-3,1	55-80	0,15
PE	24	0,10	1,34	0,6-1,4	18-30	0,33-0,54
PVC	490	0,0012	1,4	2,7-3,0	50-60	0,17-0,21
PP	515	0	0,9	1,3-1,8	25-40	0,12
PS	600	0	1,05	3,1-3,3	30-55	0,105
Natūralus smėlis	1656	1,8	2,65	70	-	4,45
Natūralus žvyras	1624	1,32	2,79	70	-	2,29-2,78
Cemento tešla	1440	-	3,15	36-40	-	1

Šiluminės savybės

Šiluminėms savybėms nustatyti buvo atlikti bandymai naudojant PET atliekas. Šios atliekos buvo susmulkintos į mažas, įvairių formų daleles ir naudojamos gaminant betoną. Rezultatai parodo, kad plastiko atliekos ženkliai sumažina įprastam betonui būdingą šiluminį laidumą – pagerina šilumos izoliacines savybes. Nustatyta, kad šilumos izoliacija padidėjo nuo 10,27 % iki 18,16 %, priklausomai nuo naudoto plastiko atliekų kiekio. Plastiko atliekos yra labai paplitusi atliekų grupė, todėl jų panaudojimas betonų gamyboje padeda ne tik sumažinti aplinkos taršą, bet ir yra ekonomiškai efektyvus [43].

Gniuždymo stipris

Betono gniuždymo atsparumui nustatyti buvo naudojami įvairių sudėčių betoniniai bandiniai sudėtyje turintys plastiko atliekų. Daugumoje literatūros šaltinių rašoma, kad didėjant plastiko atliekų kiekiui, gniuždomasis stipris mažėja. Bangladešo mokslininkų atliktame tyrime gauta [44], kad, kai vandens

ir cemento santykis (v/c) lygus 0,35, pakeitus 10 % natūralių betono užpildų plastiko atliekomis betono gniuždomasis stipris po 7 parų kietėjimo sumažėja 29 % (lyginant su betonu, kuris sudėtyje neturi plastiko) ir pakeitus natūralius užpildus 20 % – stipris sumažėja 30 %. Po 28 parų betono stipris sumažėja iki 20 % (naudojant 10 % plastiko atliekų) ir 21,8 % (naudojant 20 % plastiko atliekų). Po 90 parų kietėjimo betono stipris sumažėja 12,8 % (naudojant 10 % plastiko atliekų) ir 21,9 % (naudojant 20 % plastiko atliekų). Naudojant plastiko atliekas kaip dalinį natūralaus užpildo pakaitalą, betono gniuždomasis stipris sumažėja, tačiau įdėjus 10 % ir 20 % plastiko atliekų, gniuždymo stipris išlieka beveik toks pat. Ta pati tendencija pastebima ir bandant betoninius gaminius, kurių v/c yra lygus 0,40. Remiantis šiuo tyrimu, galima daryti išvadą, kad plastiko atliekos sumažina betono gniuždymo stiprį, tačiau atliekų kiekis nėra proporcingas gniuždymo stiprio mažėjimui.

1.3.3. Perdirbto plastiko panaudojimas kaip armuojančiojo pluošto

Plastiko pluoštas, kaip armavimo funkciją atliekanti medžiaga, padidina įprastines betono savybes ir atsparumą bei gali būti naudojamas kaip pakaitalas plieno pluoštams [45]. Lyginant su plieno pluoštu, plastiko pluoštas palieka mažesnę anglies pėdsaką, yra atsparus rūdims, pasižymi geresniu stiprumo ir svorio santykiu. Lydimo būdu perdirbtas plastiko pluoštas pasižymi geresniu tempiamuoju stipriu, lyginant su kitais plastiko pluoštais.

1.3.4. Eksploatacinės savybės

Yra atlikta tyrimų, kuriais buvo siekiama stebėti ir nustatyti fizikines ir mechanines statybinių medžiagų su plastiko atliekomis, naudojamomis kaip dalinis užpildas, savybes [46, 47]. Daugelyje anksčiau atliktų tyrimų, plastiko atliekos buvo susmulkintos į atitinkamo dydžio daleles [48]. Tada, smulkios plastiko dalelės įtrauktos į įvairius statybinius produktus ar medžiagas, tokius kaip skiedinys, betonas, plytos, šaligatviai ir kt. Yra ir tokių tyrimų, kuriuose buvo naudojamos plastiko granulės. Plastiko atliekos išlydomos tam, kad būtų galima išgauti granuliu struktūrą ir panaudoti jas kaip dalinį statybinės medžiagos užpildą [49].

Buvo tiriama plastiko atliekų, naudojamų kaip dalinis užpildas, eksploatacinės savybės, siekiant įvertinti jų tinkamumą naudoti statybos pramonėje. Iširtos gaminių, sudėtyje turinčių plastiko atliekų, ilgaamžiškumas, mechaninės savybės (svoris, tankis, atsparumas gniuždymui ir vandens įgeriamiamumas).

Svoris ir tankis

Statybos produktai su plastiko atliekomis (skiediniai, betono, plytų gaminiai) yra lengvesni dėl mažo plastiko tankio ir svorio. Keli tyrimai parodė, kad medžiagų svoris sumažėja į sudėtį įtraukus plastiką [50].

1.3.4.1 lentelė. Statybinių medžiagų, pagamintų su skirtingais plastiko užpildų santykiais, tankio pokytis [50]

Medžiaga	Plastiko santykis (%)	Tankis be plastiko (kg/m ³)	Tankis su plastiką (kg/m ³)
Betonas	0; 5; 10; 15	2400	2300-2225
Lakiųjų pelenų plyta	0,5; 1,0; 1,5; 2,0	2,0	2,1-1,8
Betonas	0; 5; 10; 15; 20	2365	2336-2221

1.3.4.1 lentelės tęsinys

Betonas	0; 2,5; 5; 7,5	2350	2340-2310
Betoninis blokelis	0; 5; 10; 15; 20; 100	2350	2250-500
Skiedinys	0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12	2000	1900-1500
Betonas	0; 5; 10	2600	2550-2450
Degta plyta	0; 5; 10	1674	1404-1330

1.3.4.1 lent. pateikta, kaip kinta tankis, tiriant betono, skiedinio ir plytų gaminius. Nagrinėta betono gaminio ir mišinio su plastikumi tankis. Pastebėta, kad į betono mišinį įdėjus plastiko granuliu, tankis sumažėja. Taip pat, didėjant plastiko kiekiui, proporcingai sumažėja ir betono gaminių tankis. Remiantis atliktais tyrimais padaryta išvada, kad betono tankis gali sumažėti dėl plastiko granuliu, naudojamų kaip užpildas, mažo savojo tankio.

Betono, sudėtyje turinčio plastiko, kietėjimo savybės

Naudojant plastiką kaip vieną iš betono sudedamųjų dalių, sumažėja betono atsparumas gniuždymui [19]. Betono atsparumas gniuždymui sumažėja nepriklausomai nuo plastiko rūšies, formos. Plastiką yra lygaus paviršiaus ir hidrofobiška medžiaga, dėl ko prastėja betono sudedamųjų dalių sukibimas ir sumažėja betono pajėgumas [51]. Tačiau Hossain [52] teigia, kad naudojant mažą plastiko kiekį (ne daugiau kaip 20%), betono gniuždymo stipris padidėja. Šis padidėjimas siejamas su didele plastiko tempiamąją geba. Betono sudėtyje naudojant pailgas plastiko daleles šlyties jėgos iš dalies paskirstomos.

Betono, turinčio savo sudėtyje plastiko, tempiamasis stipris sumažėja [52]. Pastebimi priešlaikiniai įtrūkimai betone, kurie atsiranda dėl prastų plastiko sukibimo su kitomis betono mišinio medžiagomis savybių. Dėl mažo plastiko standumo paprastai susidaro betono mišinys su sumažintu tamprumo moduliui. Taip pat, pastebimas didesnis vandens sugėrimas atsirandantis dėl padidėjusio poringumo. Nepralaidžios plastiko dalelės sudaro tiltelius tarp mikroįtrūkimų betone, taip sumažindamos mišinio pralaidumą.

1.4. Lydytas plastikas

Kanados mokslininkai atliko eksperimentinius tyrimus, kurių metu buvo kuriamas betonas maišant lydyto plastiko atliekas su smėliu ir naudojant lydytą plastiką kaip visišką smėlio pakaitalą [53].

1.4.1. Naudotos medžiagos

Tyrime naudotas smulkus natūralus užpildas– smėlis. Jis buvo surinktas iš Malio, Nigerio upės pakrantės.

Taip pat, naudotos dviejų rūšių plastiko atliekos– HDPE ir LDPE. Šios atliekos buvo surinktos iš atliekų sandėlio. HDPE ir LDPE yra labiausiai paplitusios polietileno rūšys, o polietilenas yra vienas iš plačiausiai naudojamų pasaulyje termoplastikų. Polietileno galima rasti visur– tiek prekybos centrų maišelių, tiek šampūnų buteliukų sudėtyje.

1.4.2. Smulkiagrūdis betono mišinys su išlydytu plastikumi

Natūralus upės smėlis, kaip vienintelis užpildas, buvo maišomas su skirtingais kiekiais lydyto HDPE ir LDPE plastiko ruošiant smulkiagrūdį betono mišinį su plastiko atliekomis. Smėlis buvo išdžiovintas krosnyje, naudojant 105 °C temperatūrą ir persijotas per 2 mm sietą. Plastiko atliekos

buvo susmulkintos mažais gabalėliais (mažesniais nei 6 cm ilgio), kad tilptų į krosnį. Skirtingos HDPE ir LDPE proporcijos (pagal svorio santykį) buvo išlydytos krosnyje, naudojant vidutiniškai 250 °C temperatūrą (1.4.2.1 lent.). Lydymosi procesas užtruko nuo 20 iki 45 minučių, priklausomai nuo plastiko tipo ir kiekio. Išlydytas plastikas buvo kruopščiai sumaišytas į vienalytę skystą, pastos pavidalo, masę, tuomet, tam tikras kiekis smėlio buvo pridėtas į lydytą plastiką, supilta į betono maišyklę, kai lydyto plastiko temperatūra pasiekė maždaug 100 °C. Buvo maišoma, kol susidarė vienalytis mišinys. Vidutinis maišymo laikas– apie 15 minučių. Vėliau, karštas skystas mišinys su lydytu plastikumu buvo supiltas į metalinius 10 cm skersmens, 20 cm aukščio ir 5 cm skersmens, 10 cm aukščio cilindrus. Tam, kad bandinys lengviau išsiimtų iš formos, prieš įpilant mišinį, cilindrų formų vidiniai paviršiai buvo ištepti tam tikru tepalu. Pripildžius formas mišiniu, rankiniu būdu atliktas sutankinimo procesas. Bandiniai buvo paliekami sukietėti 1, 3, 7 ir 28 parų laikotarpiui.

1.4.2.1 lentelė. Mišinio su lydytomis plastiko atliekomis santykis ir kietėjimo laikas

Bandinio žymėjimas	Naudotas plastikas	Plastiko kiekis, %	HDPE ir LDPE santykis	Granuluota medžiaga	Kietėjimo laikas, paromis
45 % P-H/L 50/50	HDPE-LDPE	45	50/50	Smėlis	1, 3, 7, 28
50 % P-H/L 60/40	HDPE-LDPE	50	60/40	Smėlis	1, 3, 7, 28
50 % P-H/L 50/50	HDPE-LDPE	50	50/50	Smėlis	1, 3, 7, 28
50 % P-H/L 40/60	HDPE-LDPE	50	60/40	Smėlis	1, 3, 7, 28
60 % P-H/L 50/50	HDPE-LDPE	50	50/50	Smėlis	1, 3, 7, 28
60 % P-H/L 40/60	HDPE-LDPE	50	40/60	Smėlis	1, 3, 7, 28
65 % P-H/L 50/50	HDPE-LDPE	65	50/50	Smėlis	1, 3, 7, 28

Betono mišinio su lydyto plastiko atliekomis proporcijos buvo parinktos remiantis preliminariais bandymais. Šių bandymų metu buvo naudojami vienodi HDPE ir LDPE plastikų kiekiai. Plastiko procentinė dalis (pakeičiant sausą smėlį) svyravo nuo 10 % iki 100 %. Atlikus šiuos preliminarius bandymus, buvo optimizuotas plastiko ir smėlio santykis, nustatyta lydymosi ir jau išlydyto plastiko liejimo temperatūros. Kai aplinkos oro temperatūra tarp 24 °C ir 30 °C, vidutinė lydymosi temperatūra krosnyje– 250 °C. Preliminarių bandymų rezultatai parodė, kad esant mažesniai nei 40 % plastiko kiekiui, smulkiagrūdis betono mišinys gautas labai nevienalytis ir kai kurios smėlio dalelės nepasidengė plastikumu. Tačiau, kai plastiko kiekis yra 70 % ir daugiau, skiedinys per skystas, dėl ko smėlio dalelės greitai nusėda. Taip pat, skiedinio su lydyto plastiko atliekomis įpylimas skystoje būsenoje neleidžia tinkamai išlieti bandinio ir tai turi įtakos kietėjimui.

Atsižvelgus į preliminarių bandymų rezultatus, priimta, kad tinkamas naudoti lydyto plastiko kiekis yra tarp 45 % ir 65 % nuo pradinės sauso smėlio masės. Parinktos 4 plastiko proporcijos: 45 %, 50 %, 60 %, 65 %, tyrimas atliktas naudojant HDPE / LDPE santykius (40 / 60, 50 / 50 ir 60 / 40) (4.2.1 lent.).

1.4.3. Mechaninės ir fizikinės savybės

Mechaninės savybės– atsparumas gniuždymui ir tempimui bei įtempiai yra labai svarbūs betono gebėjimui atlaikyti apkrovas ir nesuirti, veikiant išorinėms jėgoms. Šios savybės leidžia nustatyti

medžiagos ar produkto naudojimo laiką. Tam buvo atlikti bandymai su skiediniu, savo sudėtyje turinčiu lydyto plastiko atliekų.

Gniuždymo bandymas

Gniuždymo bandymai atlikti siekiant gniuždymo stipriui nustatyti. Šiame bandyme naudotas mechaninis presas, valdomas kompiuteriu. Gniuždymo bandymas (su ta pačia sudėtimi) buvo pakartotas bent 3 kartus, tam, kad užtikrinti rezultatų pasikartojamumą.

Gautas gniuždymo stiprio rezultatas svyruoja nuo 5 MPa iki 18 MPa

Tempimo bandymas

Buvo atliekami tempimo bandymai, naudojant 5 cm skersmens ir 10 cm aukščio cilindrinis bandinius, siekiant nustatyti tempiamąjį stiprį. Bandiniai (su ta pačia sudėtimi) buvo išbandomi bent 3 kartus, kaip ir gniuždymo stipriui nustatyti atlikti bandymai, kad gauti kuo tikslesnius rezultatus.

Sukietėjusio betono tankio nustatymas

Sukietėjusio gaminio tankis turi įtakos jo stiprumui. Tankio nustatymas taip pat buvo atliktas bent 3 kartus, kad būtų galima gauti kuo tikslesnį rezultatą.

Nustatyta, kad laikui bėgant tankis kinta, priklausomai nuo mišinio su lydytu plastikumu sudėties. Atliktų bandymų rezultatai parodo, kad vidutinis tokio mišinio tankis svyruoja nuo 1,7 g/cm³ iki 2,3 g/cm³. Mišinio su lydyto plastiko atliekomis tankis yra mažesnis dėl to, nes pačios plastiko medžiagos tankis mažas– LDPE tankis yra 0,915-0,940 g/cm³, o HDPE tankis yra 0,940-0,854 g/cm³.

Vandens įgeriamumas

Įprastam ir lydyto plastiko turinčiam skiediniui atlikti vandens įgeriamumo nustatymo bandymai panardinus bandinius į vandenį. Pirmiausia, cilindriniai bandiniai (5 cm skersmens ir 10 cm aukščio) buvo išdžiovinami vėdinamoje krosnyje, laikant bandinius 2 paras, 60 °C temperatūroje. Išdžiuvę bandiniai palikti ataušti 30 minučių kambaryje, kurio temperatūra siekė 23 °C. Tuomet, mėginiai visiškai panardinti į distiliuotą vandenį 48 valandoms. Ištraukus bandinį, vanduo nuo jo paviršiaus nušluostytas su medžiagine šluoste ir nustatytas bandinio, įgėrusio vandens, svoris. Vandens įgeriamumas, išreikštas procentais (%), yra lygus bandinių svorių skirtumui prieš panardinimą ir po panardinimo (48 valandų). Šis bandymas buvo pakartojamas 2 kartus ir iš gautų rezultatų buvo apskaičiuotas vidurkis.

Gauti rezultatai

Bandymu metu nustatytas, kad smulkiagrūdžio betono su lydytu plastikumu gniuždomasis stipris svyruoja nuo 5 MPa iki 18 MPa, priklausomai nuo plastiko kiekio ir betono kietėjimo laiko.

Tempiamasis stipris svyruoja nuo 1 MPa iki 5 MPa.

Nepriklausomai nuo plastiko kiekio, stiprumas didėja su laiku. Didžiausi stipriai gniuždymo gauti, kai buvo naudojama 50 % ir 60 % plastiko (vietoje smėlio), tempimo– kai naudotas 50 % P-H / L ir 60 % P-H / L.

Taip pat nustatyta, kad bandiniai su optimaliu plastiko kiekiu (50-60 %) geriau sukimba, todėl pasiekiamas didesnis stiprumas.

Jau po 1 paros kietėjimo bandiniai pasiekė 60-80 % savo stiprumo. Įprastas betono mišinys po 1 paros kietėjimo pasiekia ne daugiau kaip 40 % savo stiprio.

Mišinys su lydytu plastikumu turi didesnę plastiškumą laipsnį, yra lankstesnis nei įprastas betono mišinys su portlandcemenčiu. Taip pat, mišinio su plastikumu vandens įgeriamumas yra mažesnis lyginant su įprastu betonu.

Šiluminės savybės pagerėja dėl plastiko išlydymo ir/arba reakcijos su neorganinėmis medžiagomis. Remiantis gautais rezultatais, daroma išvada, kad ši medžiaga tinkama naudoti kaip statybinė medžiaga, taip sumažinant plastiko atliekų poveikį aplinkai.

2. Eksperimentinė dalis

Magistro baigiamojo darbo tyrime yra kuriamas betonas, kurio gamybai naudojamos plastiko atliekos kaip dalinis užpildas, siekiant sukurti ekologišką ir patvarų betono gaminį– blokelių. Tyrime kuriami plastiko užpildai, parenkamas racionaliausias užpildų variantas, kuriamas betono gaminys su užpildais, tiriamos betono fizikinės ir mechaninės savybės

2.1. Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas:

Panaudojant racionalų plastiko atliekų kiekį, sukurti patvarų betoninį gaminį– blokelių.

Darbo uždaviniai:

- Sukurti betono užpildus su plastiko atliekomis, nustatyti jėgas prie kurių užpildai suyra;
- Parinkti optimaliausią plastiko granulių variantą betono gamybai;
- Pagaminti betoninius bandinius su plastiko užpildais, nustatyti jų stiprumą gniuždant;
- Parinkti optimaliausią betono sudėtį blokelių gamybai;
- Nustatyti betono atsparumą šalčio poveikiui.
- Pagaminti betoninį blokelių.

2.2. Tyrime naudotos medžiagos

Vanduo

Tiek užpildams su plastiko atliekomis, tiek betonui gaminti, buvo naudotas geriamasis vanduo iš Kauno vandentiekio.

Plastikas

Plastikai yra daugybė sintetinių ar pusiau sintetinių medžiagų, kurių pagrindinė sudedamoji dalis yra polimerai. Dėl polimerų didelio plastiškumo, plastiką lengva formuoti, presuoti, sukuriant įvairių formų kietos fizikinės būsenos produktus. Dėl lengvo plastiko pritaikomumo, jis yra plačiai naudojamas įvairiose srityse.

Pagrindinės plastikų rūšys yra šios:

- PET arba PETE– polietileno tereftalatas;
- PVC– polivinilchloridas;
- LDPE– mažo tankio polietilenas;
- HDPE– didelio tankio polietilenas;
- PP– polipropilenas;
- PS– polistirenas;
- Kiti plastikai.

Baigiamojo darbo tyrime naudotas mišrus plastikas, kuris buvo gautas iš jau neeksploatuojamų automobilių laidų.

Polivinilo acetatas (PVA)

Gaminama kelių markių, iš kurių kaip universalūs klijai „Lipalas“ naudojama markės DP 51/10 polivinilacetatinė dispersija. Jie skirti klijuoti medį, odą, popierių ir kartoną. Be to naudojama buitinėje chemijoje, statybos, poligrafijos, tekstilės ir tabako pramonėje. Šios markės klijai naudojami kaip D2 klasės klijai medienos klijavimui. DP 51/20, DP 51/25 ir DP 51/30 markių polivinilacetatinės dispersijos yra naudojamos audinių įmirkymui, tekstilės (kilimų) pramonėje, odos galanterijos pramonėje. DP 51/7 markės polivinilacetatinė dispersija tinka maisto produktų įpakavimo klijavimui (kai maisto produktai nesiliečia su klijais).

Baigiamojo darbo tyrime polivinilo acetatas naudotas siekiant pagerinti granuliu su plastiko atliekomis sukibimą.

Orinės kalkės, gesintos

Kalkės – karbonatinių žaliavų degimo ir tolesnio perdirbimo produktai, turintys daug kalcio oksido arba kalcio hidroksido. Plačiausiai naudojamos statybinės kalkės– svarbi rišamoji medžiaga. Gesintas kalkes sudaro $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Kalcinavimas– temperatūra pakeliama iki 100 C, tuomet akmuo skyla ir atsiskiria anglies dioksidas (CO_2). Lieka kalcio oksidas (CaO)– negesintos kalkės, jos užpilamos vandeniu ir gaunamos gesintos kalkės (CaCO_2).

Gaminant betono užpildus su plastiko atliekomis kalkės naudotos kaip rišamoji medžiaga, tačiau pagrindinė negesintu kalkių panaudojimo priežastis užpildų gamyboje– siekis dar labiau sustiprinti užpildus juos karbonizuojant CO_2 kameroje.

Cementas (portlandcementis CEM I 42,5 R, M600)

Šis portlandcementis skirtas betonų ir skiedinių bei konstrukcijų, neapsaugotų nuo aplinkos poveikio, taip pat stipriųjų betonų gamybai tiek šiltuoju, tiek šaltuoju metų laiku. Geriausiai tinka laikančiųjų konstrukcijų, atraminių sienelių, lauko baseinų, rezervuarų betonavimui bei apdailinio mūro skiediniams.

CEM I 42,5 R– tai portlandcementas be priemaišų, kurio stiprio klasė 42,5 su padidintu ankstyvojo stiprio augimu.

Portlandcementis yra naudojamas kaip rišamoji medžiaga– gaminant granules su plastiko atliekomis cementas naudotas kaip rišiklis, siekiant pagerinti granuliu sudėtinių medžiagų tarpusavio sukibimą tam, kad būtų gautas didesnis granuliu stiprumas.

Estiški skalūno pelenai

Pelenai– tai neorganiniai junginiai, kurie lieka iš sudegusių organinių medžiagų.

Skalūnų pelenai, degiųjų skalūnų kuro atlieka, susikaupianti elektrinėse (daugiausia Estijoje ir Rusijos šiaurės vakarinėje dalyje). Turi 29–52 % CaO ; be to, juose dar yra 3,1–8,9 % MgO , 1,1–2,6 % K_2O , 0,1–0,2 % P_2O_5 , mikroelementų (1 kg pelenų turi 250–280 mg mangano, 63–150 mg cinko, 2,5–15 mg boro, 3,5–14 mg vario, 0,7–3,2 mg molibdeno, 0,7–4,1 mg kobalto). Skalūnų pelenai būna šlakiniai ir dulkiniai. Šlakiniai skalūnų pelenai gaminami iš deginamų nemaltų skalūnų; turi 1–2 % nesudegusio skalūno, 28–38 % CaO ; prieš naudojimą sijojami per 3–5 mm sietą.

Magistro baigiamajame darbe naudoti estiški šlakiniai skalūno pelenai, siekiant panaudoti ir kito tipo atliekas (ne tik plastiko), bei pagerinti gaminamų užpildų stiprumą.

Smėlis

Smėlis– tai biri nuosėdinė uoliena. Smėlis klasifikuojamas pagal dalelių dydį ir gali būti labai smulkus, smulkus, vidutinio rupumo, rupus, labia rupus ir mišrus. Taip pat ši medžiaga gali būti klasifikuojama ir pagal vyraujantį mineralą ar dominuojančias priemaišas (pvz. Gipsinis, karbonatinis, kvarcinis).

Lietuvoje yra daugiau nei 300 smėlio telkinių, tačiau ši žaliava nėra savaime atsinaujinanti ir jos išteklių viena dieną baigsis. Siekiant to išvengti, statybos sektoriuje smėlis gali būti (visiškai ar dalinai) pakeičiamas tam tikromis atliekomis.

Tyrime naudotas 0-2 mm frakcijos smėlis.

2.3. Tyrimo eiga

Tyrimo metu buvo siekiama sukurti ekologišką bei patvarų betoną, kuris būtų panaudojamas betoninio blokelių gamybai. Tyrimas atliekamas keliais etapais: pirmiausia, pagamintos plastiko granules, nustatyta jėga prie kurios bandinys suiro naudojant cilindro formą (76 mm). Prieš nustatant suirimo jėgą, granules sudėjus į formą sutankinama vibro stalu tankinant 30 sekundžių. Didžiausias jėga prie kurios bandinys suiro gauta užpildų, savo sudėtyje turinčių skalūninių pelenų. Toliau, buvo gaminami betoniniai gaminiai su racionaliausiais plastiko užpildais (su skalūniniais pelenais) ir grynu plastiku. Po 7 parų kietėjimo, atlikti stiprumo bandymai. Siekiant pagerinti betono su plastiko atliekomis stiprumines savybes, keičiama betono sudėtis ir pagaminami nauji betoniniai bandiniai su jau naujomis betono sudėtimis.

2.3.2.1 lentelė. Betono sudėtis

Medžiagos nr.	Medžiagos pavadinimas	Kiekis, kg/m ³
I		
1	plastikas	625
2	smėlis	875
3	vanduo	300
4	cementas	90
5	skalūniniai pelenai	350
II		
1	plastikas	625
2	smėlis	875
3	vanduo	300
4	cementas	200
5	skalūniniai pelenai	240
III		
1	plastikas	625
2	smėlis	875
3	vanduo	300
4	cementas	250
5	skalūniniai pelenai	190

Po 7 parų kietėjimo, dalis bandinių, siekiant dar labiau padidinti stiprumą, palikti karbonizuotis CO₂ kameroje. Nustatytas naujų betoninių bandinių stiprumas. Gauti rezultatai parodė, kad karbonizuojant

betoninius bandinius su plastiko atliekomis gaunami geresni gniuždomojo stiprio rezultatai. Rezultatų vidurkiai pateikiami žemiau:

2.3.2 lentelė. Betoninių bandinių su plastiko atliekomis gniuždomojo stiprio rezultatų vidurkiai

Nr.	Pavadinimas	Stipris gniuždant F_c , MPa
1.	I	6,2
2.	I,K	6,4
3.	I-pl	0,98
4.	I,K-pl	0,6
5.	II	8,6
6.	II,K	10,5
7.	III	10,4
8.	III,K	11,0

čia I– I sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

I,K– karbonizuoti I sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

I-pl– I sudėties betoniniai bandiniai su grynu plastiku;

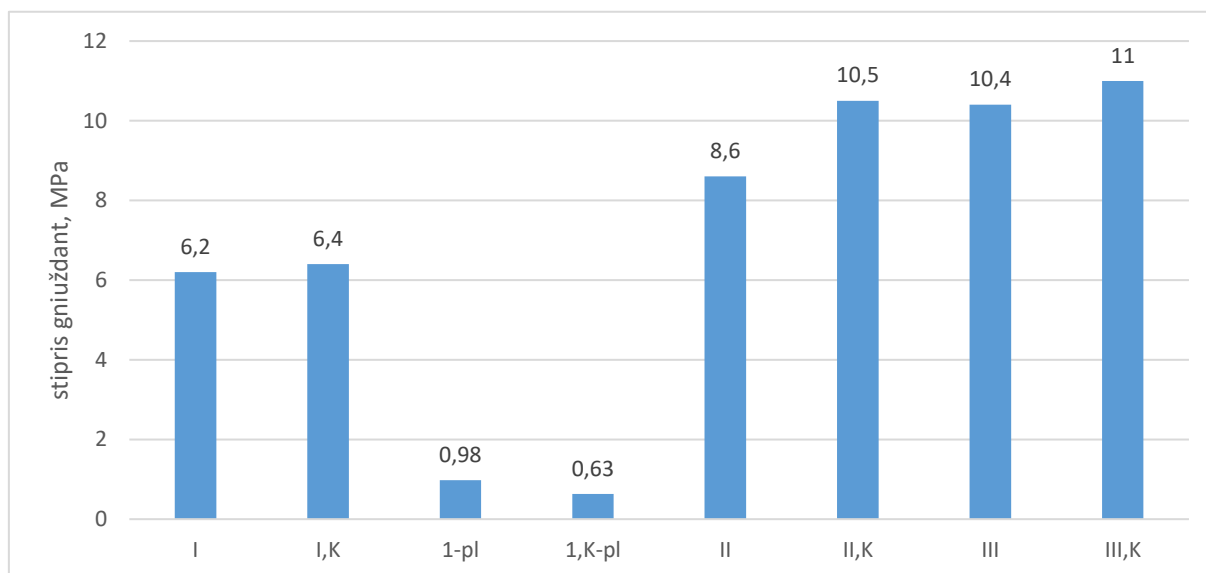
I,K,pl– karbonizuoti I sudėties betoniniai bandiniai su grynu plastiku;

II– II sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

II,K– karbonizuoti II sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

III– III sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

III,K– karbonizuoti III sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis.



2.3.2.1 pav. Betoninių bandinių su plastiko atliekomis gniuždomojo stiprio rezultatų diagrama

Geriausias stipruminės savybės gautos karbonizuoto betoninio bandinio su mažesniu skalūninių pelenų kiekiu ir didesniu cemento kiekiu (III,K)– 11,0 MPa, tačiau šio bandinio stipris nėra ženkliai didesnis nei karbonizuoto betoninio bandinio su didesniu skalūninių pelenų kiekiu ir mažesniu cemento kiekiu (II,K)– 10,5 MPa. Todėl optimesniu variantu laikomas daugiau atliekų sudėtyje turintis betonas (II,K), iš šio betono gaminamas blokelis.

3. Tyrimo metodai

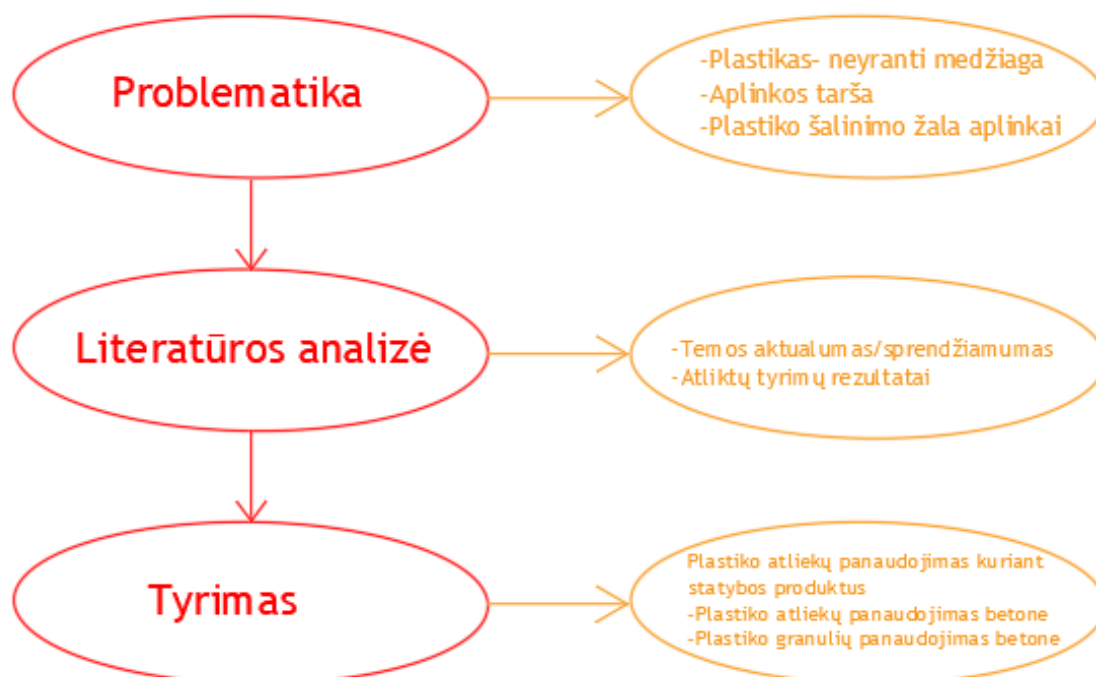
Magistro baigiamasis darbas atliktas naudojant taikomąjį metodą. Ieškomas optimaliausias betono mišinys su plastiko atliekomis, dalinai smėlį keičiant plastiko granulėmis/grynu plastikumu, siekiant sukurti ekologišką, pagamintą iš ilgai nesuyrančių plastiko atliekų, betoninių gaminių – blokelių.

Tyrimo metu naudotas plastikas, likęs kaip atlieka iš jau neeksploatuojamų automobilių laidų. Plastikumas yra lygų paviršių turintis polimeras. Naudojant gryno plastiko atliekas betono sudėtyje, teoriškai, betono sukibimas turėtų suprastėti, todėl ir stipruminės betono savybės sumažėtų. Tyrimo metu bandoma plastiko atliekas apdirbti, „uždaryti“ plastiką sukuriant granules. Šiai teorijai patvirtinti atlikti bandymai su betono gaminiais kai naudotas ir grynas plastikumas, ir plastiko granules.

Problematika. Nuolatinė plėtra pramonės ir technologijų srityje sugeneruoja didelius kiekius atliekų, kurios yra išmetamos į sąvartynus, sukeldamos aplinkos taršą ir visuomenės sveikatos problemas [1]. Didžioji dalis šių atliekų išlieka aplinkoje šimtus ar net tūkstančius metų [2]. Todėl visos atliekos turėtų būti pašalinamos arba perdirbamos, tam, kad būtų galima iš anksto apsaugoti gamtą. Vienas iš veiksmingiausių būdų, taikomų sprendžiant su kietosiomis atliekomis susijusias problemas, yra žiedinės ekonomikos pritaikymas – atliekų perdirbimas ir panaudojimas antrą kartą. Šį metodą galima taikyti ieškant būdų kaip panaudoti plastiko atliekas kuriant statybos produktus.

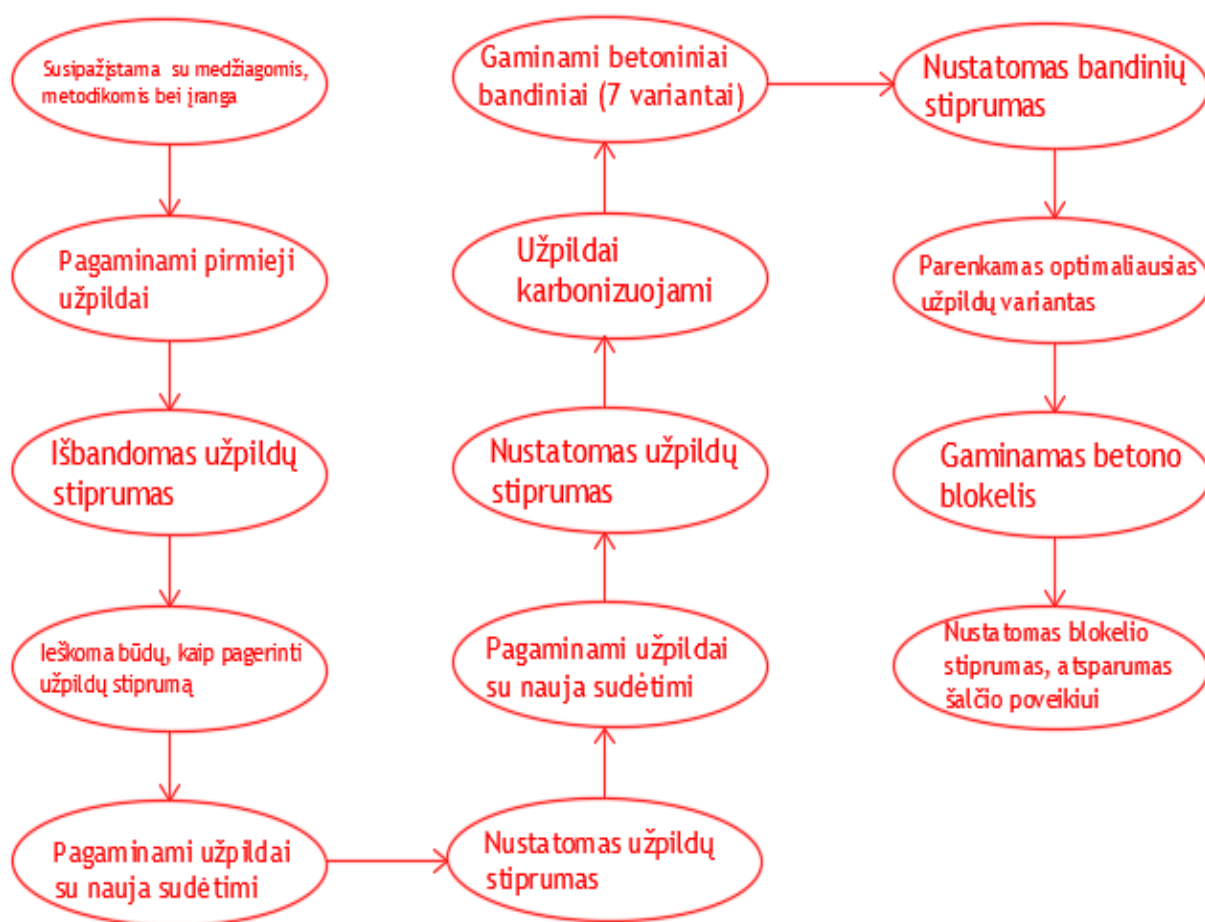
Tyrimo tikslas. Tyrimu, kurio metu plastiko atliekos panaudojamos siekiant sukurti betoninį gaminių – blokelių, sumažinti plastiko atliekų kiekį, aplinkos taršą, ir, tuo pačiu, ieškoti būdų statybos produktų mechaninėms ir/arba fizikinėms savybėms pagerinti.

Tyrimo srauto diagrama:



3.1 pav. Tyrimo srauto diagrama

Tyrimo metodai. Pirmiausia, susipažįstama su medžiagomis, metodikomis bei įranga. Tuomet atliekami pirminiai bandymai– pagaminami pirmieji užpildai granuliuojant, išbandomas jų stiprumas. Ieškoma, kaip galima padidinti užpildų stiprumą– keičiama granulių sudėtis. Pagaminamos plastiko granulės su pagerinta sudėtimi (šiuo atveju į sudėtį pridėta cemento). Nustatomas granulių gniuždomasis stipris, antrą kartą ieškoma, kaip dar galima pagerinti granulių stiprumą (šį kartą padidintas cemento kiekis ir pridėta skalūninių pelenų). Atliktas gniuždomojo stiprio nustatymo bandymas. 3 sudėčių užpildai karbonizuoti CO₂ kameroje, siekiant dar labiau padidinti stiprumą. Turint 7 betono užpildų variantus (3 variantai nekarbonizuotų plastiko granulių, 3 variantai karbonizuotų plastiko granulių ir negranuoliuotos plastiko atliekos), gaminami betono bandiniai. Nustatomas betono bandinių gniuždomasis stipris ir parenkamas racionaliausias užpildų variantas. Turint racionaliausią užpildų variantą, gaminamas betono blokelis. Atliekamas betono blokelių gniuždymo stiprio nustatymo bandymas, atsparumo šalčiui nustatymo bandymas.



3.2 pav. Tyrimų eiga ir metodai

Patikimumo/validacijos vertinimas. Vidinis– pasitikėjimas rezultatų tikslumu. Tyrimams atlikti naudota patikima universiteto įranga.

Išorinis– visiems betono gaminiams atliekami gniuždymo stiprio nustatymo bandymai bandant 3 tokius pačius gaminius, siekiant išvengti tam tikrų nuokrypių bei tyrimų autentiškumui pagrįsti.

3.1. Užpildų gamyba

Užpildų su plastikų gamyba prasideda nuo sudėties parinkimo, tuomet medžiagos supilamos į maišyklę ir maišoma apie 10 min.

Parinkamos 5 užpildų sudėtys, pagaminami 5 užpildų variantai

Pirmųjų užpildų gamybai naudojamos plastiko atliekos, orinės gesintos kalkės, vanduo. Taip pat, gaminant pirmąją seriją užpildų įdėta PVA (polivinilchlorido emulsija), siekinat gauti geresnį užpildų sukibimą. Pagaminus pirmuosiuos užpildus su PVA ir be PVA dalis jų patalpinama į CO₂ kamerą siekiant užpildus karbonizuoti. Gauti rezultatai parodo, kad karbonizacija neįvyksta. Siekiant gauti stipresnius užpildus, jų sudėtis tobulinama – pridedamas cementas

3.1.1 lentelė. I užpildų variantas

Medžiagos pavadinimas	Kiekis, g
I su PVA	
plastikas	320
orinės gesintos kalkės	400
vanduo	250
PVA	10
I be PVA	
plastikas	320
orinės kalkės, gesintos	400
vanduo	250

Antriesiems užpildams pagaminti naudojamas cementas, plastikas, orinės gesintos kalkės, vanduo. Dalis užpildų gaminama su PVA emulsija, dalis be.

3.1.2 lentelė. II užpildų variantas

Medžiagos pavadinimas	Kiekis, g
II su PVA	
cementas	300
plastikas	320
orinės gesintos kalkės	100
vanduo	135
PVA	20
II be PVA	
cementas	300
plastikas	320
orinės gesintos kalkės	100
vanduo	135

Trečiųjų užpildų gamybai kalkės, kaip rišamoji medžiaga, jau nenaudojamos. Jos pakeičiamos ekologiškesne medžiaga – šlakiniais skalūniniais pelenais. Taip pat, sudėtyje naudojamas cementas, plastikas ir vanduo.

3.1.3 lentelė. III užpildų variantas

Medžiagos pavadinimas	Kiekis, g
cementas	80
plastikas	320
Skalūniniai pelenai	500
vanduo	155

3.1.1. Užpildų stiprumo nustatymas

Jėgai, prie kurios užpildai suyra nustatyti atliekami bandymai. Bandymo objektas (užpildai) patalpinamas į 76 mm skersmens cilindro formos talpą. Tuomet, naudojant vibro stalą, užpildai tankinami 30 sekundžių. Užpildus sutankinus, atliekamas ardančiosios jėgos nustatymas mechaniniu presu „Toni Technik“. Bandiniai gniuždomi tol, kol susigniuždo iki ant cilindro formos pažymėtos ribos (20 mm).



3.3.1.1 pav. „Toni Technik“ stiprio nustatymo prietaisas

Visi bandymai atliekami bandant užpildus 3 kartus, siekiant gauti patikimus rezultatus. Atlikus bandymus apskaičiuojamas rezultatų vidurkis.

3.1.1.1 lentelė. Užpildų su I sudėtimi bandymų rezultatai

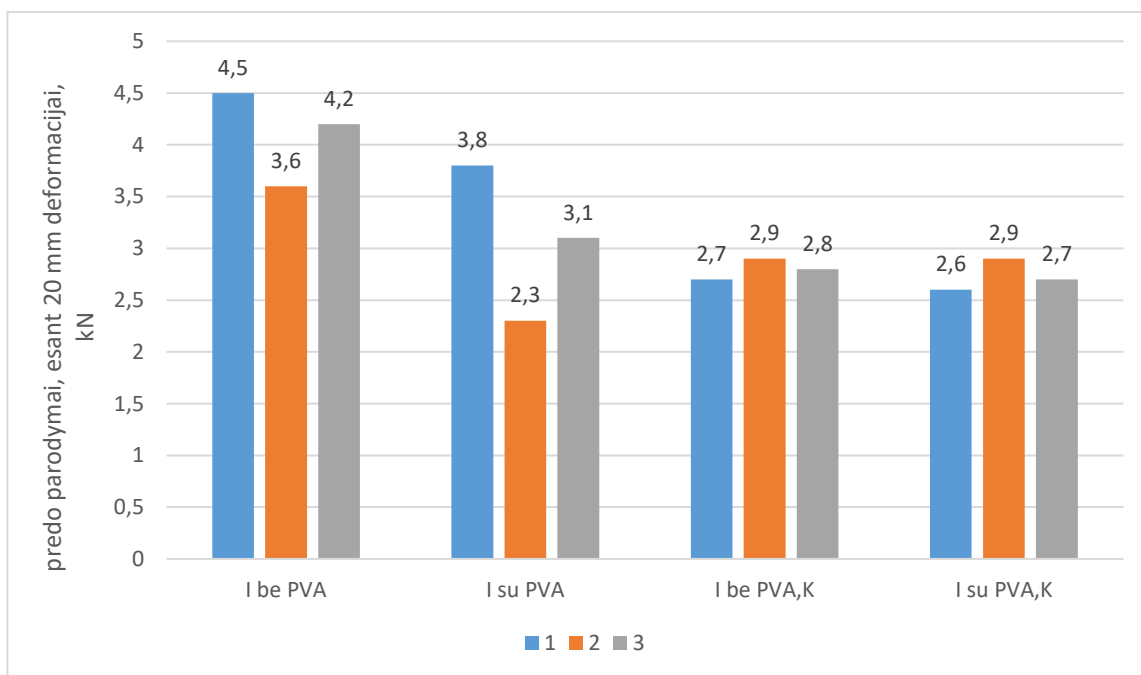
Nr.	Pavadinimas	Preso parodymai esant 20mm deformacijai F, kN
1.	I be PVA-1	4,5
2.	I be PVA-2	3,6
3.	I be PVA-3	4,2
4.	I su PVA-1	3,8
5.	I su PVA-2	2,3
6.	I su PVA-3	3,1
7.	I be PVA,K-1	2,7
8.	I be PVA,K-2	2,9
9.	I be PVA,K-3	2,8
10.	I su PVA,K-1	2,6
11.	I su PVA,K-2	2,9
12.	I su PVA,K-3	2,7

čia I be PVA-1, I be PVA-2, I be PVA-3– užpildai su plastiku, vandeniu, orinėmis gesintomis kalkėmis;

I su PVA-1, I su PVA-2, I su PVA-3– užpildai su plastiku, vandeniu, orinėmis gesintomis kalkėmis ir PVA emulsija;

I be PVA,K-1, I be PVA,K-2, I be PVA,K-3– užpildai su plastiku, vandeniu, orinėmis gesintomis kalkėmis, karbonizuoti CO₂ kameroje;

I su PVA,K-1, I su PVA,K-2, I su PVA,K-3– užpildai su plastiku, vandeniu, orinėmis gesintomis kalkėmis ir PVA emulsija, karbonizuoti CO₂ kameroje.



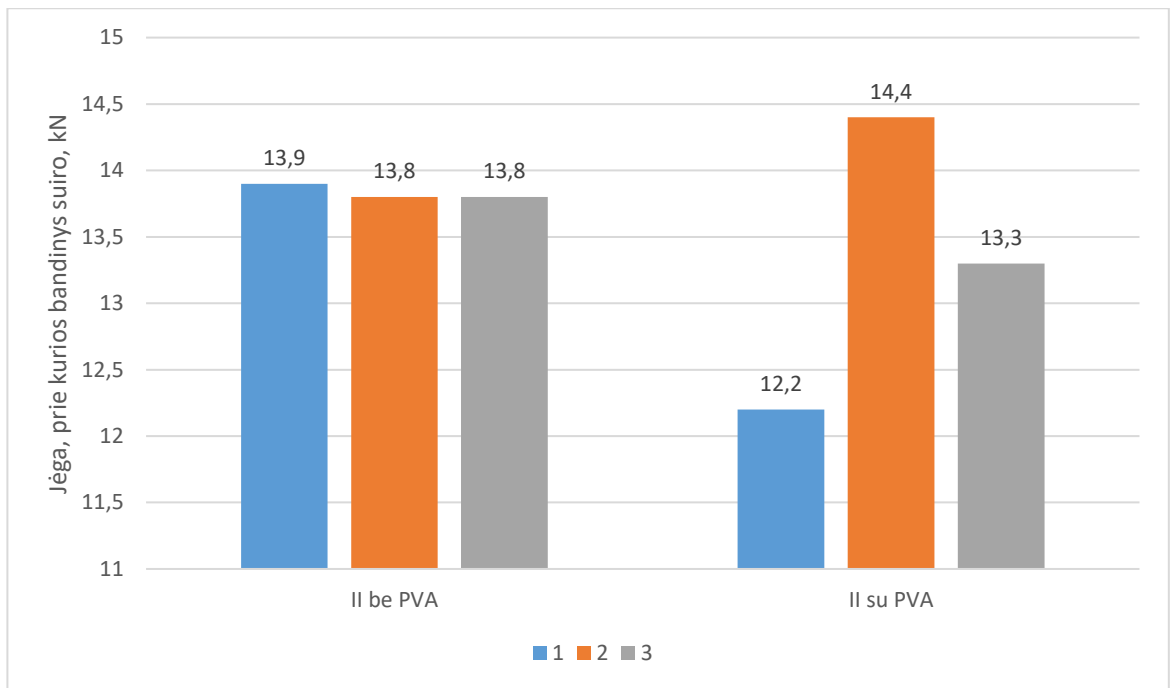
3.4.1.2 pav. Užpildų su I sudėtimi stiprio nustatymo grafiniai rezultatai

3.1.1.2 lentelė. Užpildų su II sudėtimi bandymų rezultatai

Nr.	Pavadinimas	Jėga, prie kurios suiro bandinys F, kN
1.	II be PVA-1	13,9
2.	II be PVA-2	13,8
3.	II be PVA-3	13,8
4.	II su PVA-1	12,2
5.	II su PVA-2	14,4
6.	II su PVA-3	13,3

čia II be PVA-1, II be PVA-2, II be PVA-3– užpildai su plastiku, vandeniu, orinėmis gesintomis kalkėmis, cementu;

II su PVA-1, II su PVA-2, II su PVA-3– užpildai su plastiku, vandeniu, orinėmis gesintomis kalkėmis, cementu ir PVA emulsija.

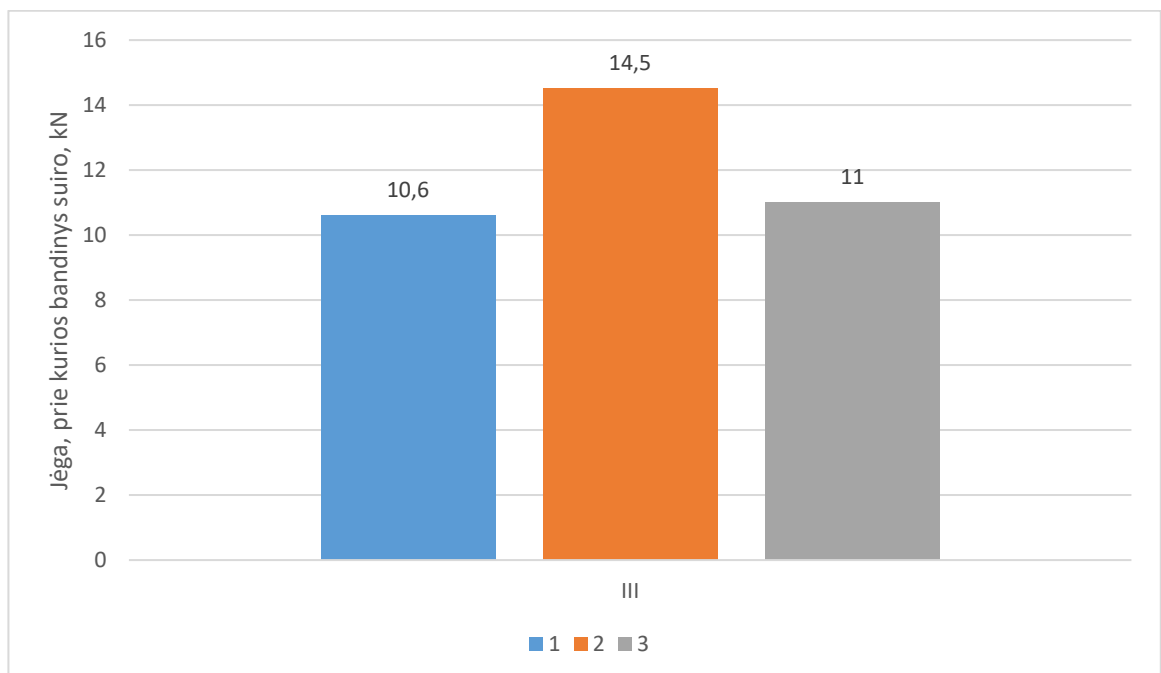


3.5.1.3 pav. Užpildų su II sudėtimi suirimo jėgos nustatymo grafiniai rezultatai

3.1.1.3 lentelė. Užpildų su III sudėtimi bandymų rezultatai

Nr.	Pavadinimas	Jėga, prie kurios suiro bandinys F, kN
1.	III-1	13,9
2.	III-2	13,8
3.	III-3	13,8

čia III-1, III-2, III-3– užpildai su plastikumu, cementu, vandeniu ir skalūniniais pelenais.

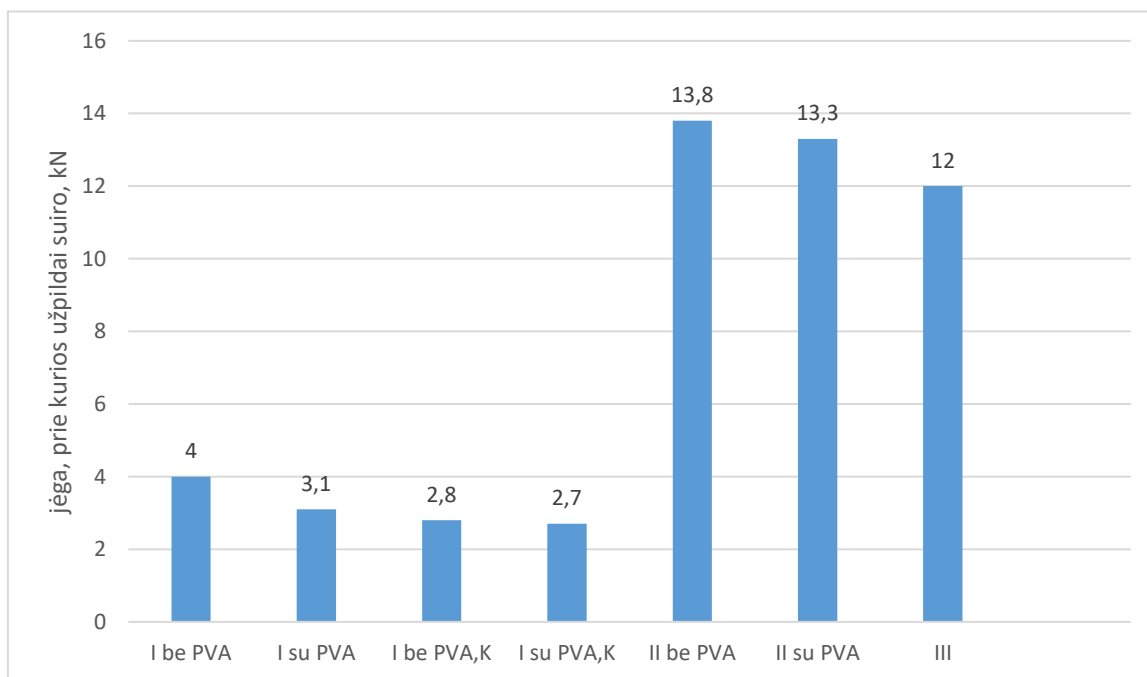


3.6.1.4 pav. Užpildų su III sudėtimi suirimo jėgos nustatymo grafiniai rezultatai

Apskaičiuojami skirtingų užpildų variant ardančiosios jėgos vidurkiai, rezultatai pateikiami grafiškai.

3.1.1.4 lentelė. Užpildų skirtingų variantų ardančiųjų jėgų vidurkiai

Nr.	Pavadinimas	Gniuždomas plotas A, mm ²	Jėga, prie kurios bandinys suiro F, kN
1.	I be PVA	4534,16	4,0
2.	I su PVA	4534,16	3,1
3.	I be PVA,K	4534,16	2,8
4.	I su PVA,K	4534,16	2,7
5.	II be PVA	4534,16	13,8
6.	II su PVA	4534,16	13,3
7.	III	4534,16	12,0



3.7.1.5 pav. Užpildų skirtingų variantų ardančiųjų jėgų vidurkių grafiniai rezultatai

Gauti rezultatai parodo, kad PVA emulsijos naudojimas, kaip rišamosios medžiagos, nepasiteisino, todėl gaminant III užpildų variantą ši medžiaga jau nenaudota. Taip pat, pagal gautus rezultatus galima matyti, kad karbonizacija neįvyko– gauti geresni stiprumo rezultatai nekarbonizuotų užpildų.

Didžiausia ardančioji jėga gauta bandant II be PVA užpildus– 13,8 kN, tačiau rezultatai neženkliai geresni nei III sudėties– 12,0 kN. Todėl betono gamybai parenkamas optimalus variantas– betonas gaminamas naudojant III sudėties ekologiškesnius užpildus.

3.2. Betono su plastiko atliekomis gamyba

Parinkus optimalų užpildų variantą gaminamas betonas, kurio sudėtyje naudojami plastiko užpildai. Betono sudėtis tobulinama siekiant gauti kuo stipresnį betono gaminį. Taip pat, norint dar labiau sustiprinti betoną, gaminiai karbonizuojami.

Tyrimai atliekami ir naudojant gryną plastiką (ne granuliuotą) betono gamybai, norint įsitikinti, kad betono gaminių gniuždomasis stipris didesnis plastiko atliekas granuluojant.

Betononinių bandinių gamyba prasideda nuo sudėties pasirinkimo– parenkami 3 betono sudėčių variantai.

3.2.1 lentelė. I betono sudėtis 1m³

Medžiagos pav.	Kiekis , kg
<u>Su plastiko granulėmis</u>	
plastikas(granulės)	625
smėlis	875
vanduo	90
cementas	350
<u>Su grynu plastikų</u>	
plastikas (grynas)	750
smėlis	750
vanduo	90
cementas	350

Gavus pirmojo betoninio bandinio rezultatus, sudėtis tobulinama– sukuriamos dvi naujos betono sudėtys. Betono gniuždymo stiprio bandymais nustatyta, kad betono su grynu plastikų siprumo rezultatai ženkliai mažesni, todėl betono bandiniai su II ir III gaminami tik su granuliuotu plastikų. II ir III prie I-osios sudėties komponentų pridėta skalūninių pelenų, parinkti skirtingi medžiagų kiekiai.

3.3.2 lentelė. II betono sudėtis 1m³

Medžiagos pav.	Kiekis , kg
plastikas(granulės)	996
smėlis	875
vanduo	300
cementas	200
skalūniniai	240

3.4.3 lentelė. III betono sudėtis 1m³

Medžiagos pav.	Kiekis , kg
plastikas(granulės)	996
smėlis	875
vanduo	300
cementas	250
Skalūniniai pelenai	190

Sudėjus reikiamus komponentus į betono maišyklę, maišoma keletą minučių (3.2.1 pav.), betonas sutankinamas ir supilamas į cilindro formas. Betoniniai bandiniai paliekami kietėti 7 paroms.



3.8.1 pav. Betono maišymo procesas maišyklėje

3.2.1. Betono gniuždomojo stiprio nustatymas

Po 7 parų kietėjimo betoniniai bandiniai pasveriami bei išmatuojami (3.2.1.1 lent.).

3.5.1.1 lentelė. Betoninių bandinių svoris ir matmenys

Bandinio nr.	Bandinio pav	Svoris, g	Skersmuo (d), mm	Aukštis (h), mm
1.	I-1	1161,3	85	72
2.	I-2	1194,5	85	73
3.	I-3	1197,9	85	74
4.	I,K-1	1152,5	85	73
5.	I,K-2	1174,6	85	74
6.	I,K-3	1190,0	86	75
7.	1-pl1	926,5	86	72
8.	1-pl2	965,7	86	73
9.	1-pl3	981,5	87	80
10.	1,K-pl1	993,9	87	78
11.	1,K-pl2	1008,5	87	78
12.	1,K-pl3	979,3	87	76
13.	II-1	1020,7	85	61
14.	II-2	1212,3	86	70
15.	II-3	1113,6	85	68
16.	II,K-1	1233,1	82	71
17.	II,K-2	1210,5	82	70
18.	II,K-3	1339,5	83	72

3.2.1.1 lentelės tęsinys

19.	III-1	1150,9	86	69
20.	III-2	1206,6	85	69
21.	III-3	1188,4	86	69
22.	III,K-1	1310,6	86	74
23.	III,K-2	1298,4	86	74
24.	III,K-3	1286,2	85	72

čia I-1, I-2, I-3– I sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

I,K-1, I,K-2, I,K-3– karbonizuoti I sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

I-pl1, I-pl2, I-pl3– I sudėties betoniniai bandiniai su grynu plastiku,

I,K-1, I,K-2, I,K-3– karbonizuoti I sudėties betoniniai bandiniai su grynu plastiku;

II-1, II-2, II-3– II sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

II,K-1 II,K-2, II,K-3– karbonizuoti II sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

III-1, III-2, III-3– III sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis;

III,K-1, III,K-2, III,K-3– karbonizuoti III sudėties betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis.

Tuomet, nustatomas gniuždomasis stipris „Toni Technik“ (3.1.1.1 pav.) mechaniniu presu. Bandiniai gniuždomi tol, kol suyra. Gaunama jėga, prie kurios bandinys suiro. Iš 3 bandinių išvedamas vidurkis. Tuomet, iš turimų duomenų apskaičiuojamas gniuždymo stipris:

$$F_c = \frac{F}{A} \quad (3.2.1.1)$$

čia F_c – stipris gniuždant (MPa);

F – didžiausia ardomoji apkrova (N);

A – bandinio skerspjūvio plotas (mm^2).

Bandinio skerspjūvio plotas apskaičiuojamas taip:

$$A = 3,14 * r^2 \quad (3.2.1.2)$$

čia r – bandinio spindulys (mm)

3.6.1.2 lentelė. Betoninių bandinių gniuždomasis stipris

Nr.	Pavadinimas	Jėga, prie kurios bandinys suiro F, N	Gniuždomas plotas A, mm^2	Stipris gniuždant F_c , MPa
1.	I-1	26900	5672	4,7
2.	I-2	29300	5672	5,2
3.	I-3	31700	5672	8,6
4.	I,K-1	34800	5672	6,1
5.	I,K-2	36700	5672	6,5
6.	I,K-3	38800	5806	6,9
7.	I-pl1	5300	5806	0,91
8.	I-pl2	5700	5942	0,98
9.	I-pl3	6100	5942	1,0

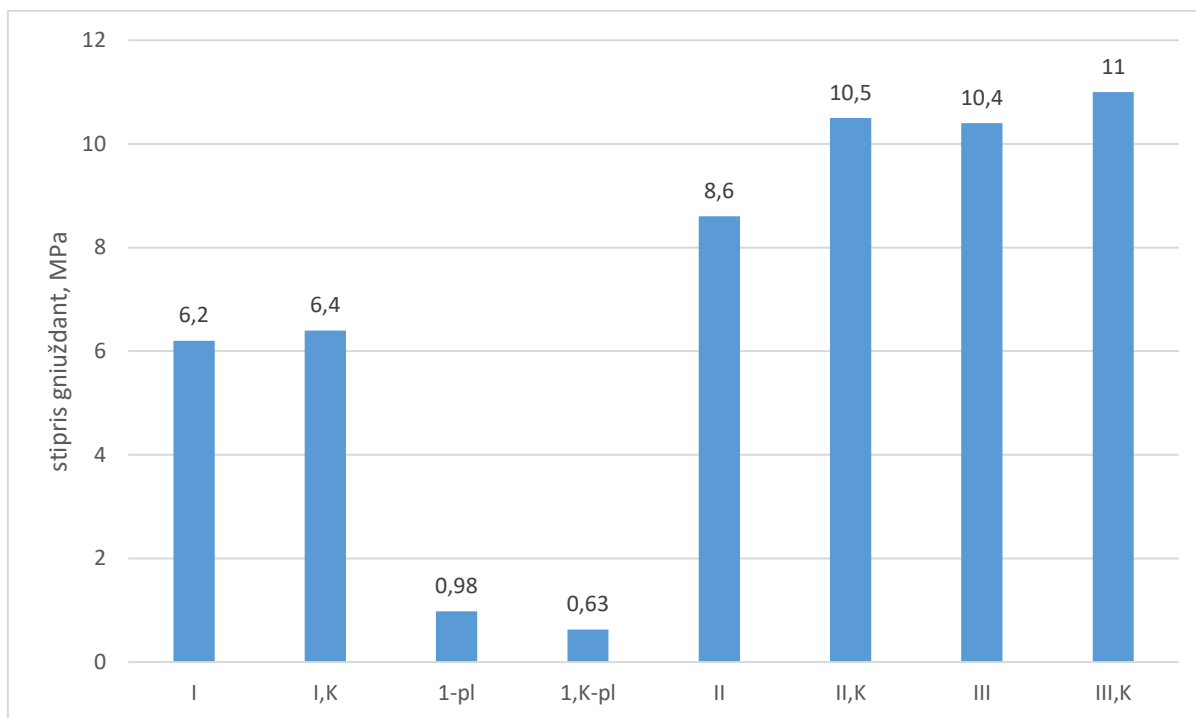
3.2.1.2 lentelės tęsinys

10.	I,K-pl1	3740	5942	0,63
11.	I,K-pl2	4220	5942	0,71
12.	I,K-pl3	3260	5942	0,55
13.	II-1	45000	5672	7,9
14.	II-2	52000	5806	9,0
15.	II-3	48600	5672	8,9
16.	II,K-1	54400	5278	10,3
17.	II,K-2	52100	5278	9,9
18.	II,K-3	59600	5408	11,0
19.	III-1	55800	5806	9,8
20.	III-2	60100	5672	10,6
21.	III-3	57600	5806	9,9
22.	III,K-1	68100	5806	11,7
23.	III,K-2	62800	5806	10,8
24.	III,K-3	58800	5672	10,4

Apskaičiavus gniuždomąjį stiprį visų bandinių, imamas vidurkis. Pateikiama gniuždomojo stiprio vidurkių suvestinė lentelė.

3.7.1.3 lentelė. Skirtingų betono variantų vidurkių gniuždomojo stiprio rezultatų lentelė

Nr.	Pavadinimas	Stipris gniuždant F_c , MPa
1.	I	6,1
2.	I,K	6,4
3.	I-pl	0,98
4.	I,K-pl	0,63
5.	II	8,6
6.	II,K	10,5
7.	III	10,4
8.	III,K	11,0



3.9.1.1 pav. Skirtingų betono variantų vidurkių gniuždomojo stiprio grafiniai rezultatai

3.3. Betono su plastiko užpildais, žvirgždu ir keramzitu palyginimas

Parinkus betono su plastiko užpildais sudėtį, gaminamas betonas ir su natūraliu stambiu užpildu–naudojant žvirgždą ir keramzitą.

Plastiko granulių tankis– 1312 kg/m³, žvirgždo– 2650 kg/m³, keramzito– 810 kg/m³.

Pagaminus šių 3 betonų bandinius, atliekami gniuždomojo stiprio nustatymo bandymai.

3.3.1. Betono su plastiko užpildais, žvirgždu ir keramzitu gamyba

Betono su plastiko granulėmis gamybai naudojama tokia betono sudėtis, kokia parinkta betoninio blokelių gamybai.

8.3.3.1. lentelė. Betono su plastiko granulėmis, žvirgždu ir keramzitu sudėtys

	betonas su plastiko granulėmis	betonas su žvirgždu	betonas su keramzitu
smėlis, kg	5,25	5,25	5,25
cementas, kg	1,2	1,2	1,2
vanduo, l	1	0,8	0,8
skalūniniai pelenai, kg	1,44	1,44	1,44
stambus užpldas, kg	2,0	4,04	1,235

3.3.2. Betono su plastiko užpildais, žvirgždu ir keramzitu gniuždomojo stiprio nustatymas

Turint 3 skirtingas betono sudėtis, gaminama betoniniai bandiniai. Po 7 parų kietėjimo betoniniai bandiniai pasveriami bei išmatuojami (3.2.1.1 lent.).

9.3.2.3 lentelė. Betoninių bandinių svoris ir matmenys

Bandinio nr.	Bandinio pav	Svoris, g	Skersmuo (d), mm	Aukštis (h), mm
1.	plas-1	1299,6	86	72
2.	plas-2	377,7	86	76
3.	plas-3	1289,2	86	73
4.	žvirgž-1	1466,1	87	69
5.	žvirgž-2	1486,9	86	70
6.	žvirgž-3	1576,8	86	75
7.	keram-1	1203,3	86	76
8.	keram-2	1152,8	86	72
9.	keram-3	1199,1	86	74

čia *plas-1, plas-2, plas-3*– betoniniai bandiniai, kai plastiko užpildai naudoti kaip stambus užpildas;

žvirgž-1, žvirgž-2, žvirgž-3– betoniniai bandiniai, kai žvirgždas naudotas kaip stambus užpildas;

keram-1, keram-2, keram-3– betoniniai bandiniai, kai keramzitas naudotas kaip stambus užpildas.

Tuomet, nustatomas gniuždomasis stipris „Toni Technik“ (3.1.1.1 pav.) mechaniniu presu. Bandiniai gniuždomi tol, kol suyra. Gaunama jėga, prie kurios bandinys suiro. Iš 3 bandinių išvedamas vidurkis. Tuomet, iš turimų duomenų apskaičiuojamas gniuždymo stipris:

$$F_c = \frac{F}{A} \quad (3.3.2.1)$$

čia F_c – stipris gniuždant (MPa);

F – didžiausia ardomoji apkrova (N);

A – bandinio skerspjūvio plotas (mm^2).

Bandinio skerspjūvio plotas apskaičiuojamas taip:

$$A = 3,14 * r^2 \quad (3.3.2.2)$$

čia r – bandinio spindulys (mm)

3.3.10.2 lentelė. Betoninių bandinių su plastiko granulėmis, žvirgždu ir keramzitu gniuždomasis stipris

Nr.	Pavadinimas	Jėga, prie kurios bandinys suiro F, N	Gniuždomas plotas A, mm^2	Stipris gniuždant F_c , MPa
1.	plas-1	74160	5806	12,8
2.	plas-2	59740	5806	10,3
3.	plas-3	72900	5806	12,6
4.	žvirgž-1	177800	5942	29,9
5.	žvirgž-2	161260	5806	27,8
6.	žvirgž-3	149520	5806	25,8
7.	keram-1	66180	5806	12,0
8.	keram-2	58300	5806	10,6
9.	keram-3	54270	5806	9,9

Apskaičiavus gniuždomąjį stiprį visų bandinių, imamas vidurkis. Pateikiama gniuždomojo stiprio vidurkių suvestinė lentelė.

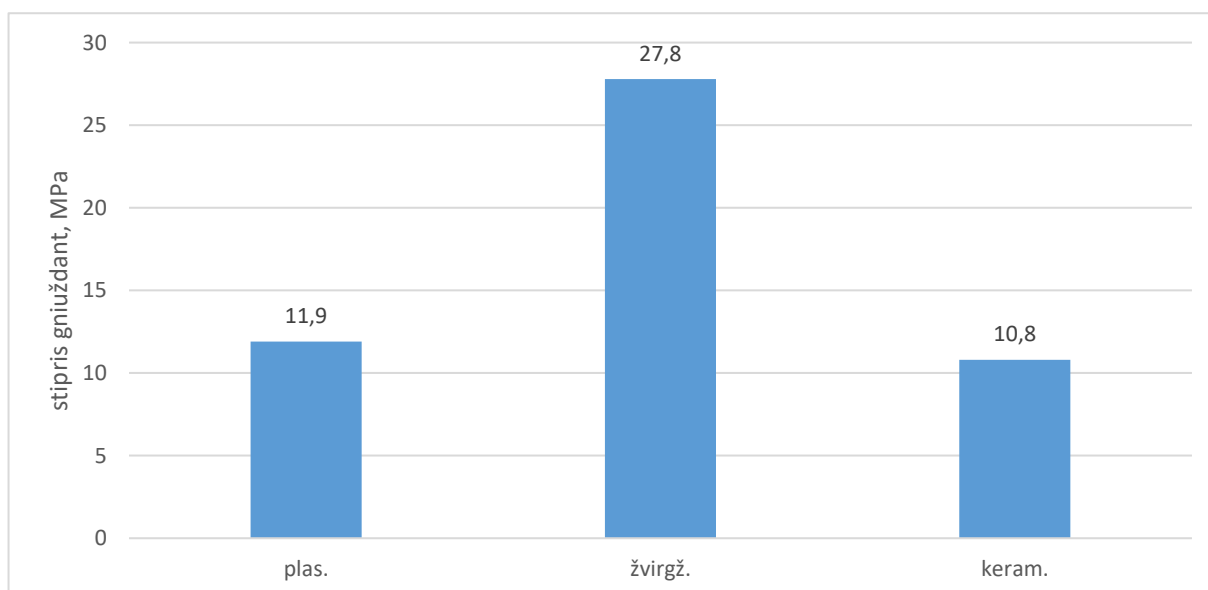
3.3.11.3 lentelė. Betonų su plastiko granulėmis, žvirgždu ir keramzitu vidurkių gniuždomojo stiprio rezultatai

Nr.	Pavadinimas	Stipris gniuždant F_c , MPa
1.	plas.	11,9
2.	žvirgž.	27,8
3.	keram.	10,8

čia *plas.*– betoniniai bandiniai, kai plastiko užpildai naudoti kaip stambus užpildas;

žvirgž.– betoniniai bandiniai, kai žvirgždas naudotas kaip stambus užpildas;

keram.– betoniniai bandiniai, kai keramzitas naudotas kaip stambus užpildas.



3.3.10.1 pav. Betonų su plastiko granulėmis, žvirgždu ir keramzitu vidurkių gniuždomojo stiprio rezultatai

Remiantis gautais rezultatais galima matyti, kad geriausiomis stipruminėmis savybėmis pasižymi betonas, kurio sudėtyje naudotas žvirgždas kaip stambusis užpildas. Betonas su keramzito stambiuoju užpildu yra pats silpniausias.

3.4. Vandens įgeriamumas, atsparumo šalčiui prognozavimas

Šiam tyrimui naudojami 3 skirtingų sudėčių cilindriniai betoniniai bandiniai– su plastiko granulėmis, žvirgždu bei keramzitu. Bandymai atlikti po 7 parų kietėjimo, turimai atlikti 2 kiekvienos sudėties bandiniams. Pirmiausia, sausi bandiniai paveriami, tuomet įmerkami į vandenį ir pasveriami po 15 min., 60 min., 24 val. ir 48 val.. Taip pat, po 48 val. bandiniai pasveriami vandenyje naudojant hidrostatines svarstyklės. Turint svorius, apskaičiuojamas vandens įgėris:

$$W_p = \frac{m_{48} - m_s}{m_s} * 100 \% \quad (3.4.1.)$$

čia W_p – vandens įgėris, %;

m_s – masė ore, sauso bandinio, g;

m_{48} – masė vandenyje, po 48 valandų, g.

3.4.12 lentelė. Vandens įgeriamumo skaičiavimo rezultatai

	Bandinys su plastiko granulėmis		Bandinys su žvirgždu		Bandinys su keramzitu	
	1	2	3	4	5	6
Bandinio nr.						
Sausas bandinys, g	557,6	632,8	669,0	715,6	696,2	387,7
Po 15 min., g	585,4	653,7	699,0	748,6	750,2	417,7
Po 60 min., g	593,8	661,0	708,6	758,9	760,5	420,8
Po 24 val., g	614,9	681,2	714,4	762,5	763,5	424,8
Po 48 val., g	615,1	682,7	714,8	764,5	763,9	425,2
Bandinys vandenyje, g	314,5	355,8	408,2	436,3	366,5	186,2
W_p , %	10,31	7,89	6,85	6,83	9,72	9,67
W_p vidurkis, %	9,1		6,84		9,70	

Gauti rezultatai parodo, kad mažiausias vandens įgėris yra betone su žvirgždu– 6,84% (žvirgždo tankis–2650 kg/m³), o didžiausias– betone su keramzitu– 9,70% (keramzito tankis– 810 kg/m³). Betono su plastiko granulėmis tankis– 9,1% (plastiko granuliu tankis– 1312 kg/m³). Betono sudėtys vienodos, skiriasi tik stambus užpildas, todėl, remiantis skaičiavimais, galima padaryti išvadą– kuo didesnis betono tankis, tuo mažesnis vandens įgeriamumas.

Taip pat, paskaičiuojami uždaras, atviras poringumas bei atsparumo šalčiui kriterijus. Atsparumo šalčiui kriterijus parodo, kiek apytiksliai šildymo bei šaldymo ciklų betonas atlaikys.

Bandinių tankis:

$$\rho = \frac{m_s}{m_{48} - m_v} * 1000, \text{ kg/m}^3 \quad (3.4.2.)$$

čia ρ – tankis, kg/m³;

m_v – masė vandenyje, g.

Vandens įgėris pagal tūrį:

$$W_{p(t)} = \frac{(W_p * \rho)}{1000}, \% \quad (3.4.3.)$$

čia $W_{p(t)}$ – vandens įgėris pagal tūrį, %;

W_p – vandens įgėris pagal masę, %

Vandens įgėris po 15 min. :

$$W_{15} = \frac{m_{15} - m_s}{m_s} * 100, \% \quad (3.4.4.)$$

čia W_{15} – vandens įgėris po 15 min., %;

m_{15} – masė po 15 min. vandenyje, g.

Vandens įgėris po 60 min. :

$$W_{60} = \frac{m_{60} - m_s}{m_s} * 100, \% \quad (3.4.5.)$$

čia W_{60} – vandens įgėris po 60 min., %;

m_{60} – masė po 60 min. vandenyje, g.

Santykis tarp vandens įgėrio po 15 min. ir vandens įgėrio pagal masę :

$$W_{15(s)} = \frac{W_{15}}{W_p}, \% \quad (3.4.6.)$$

Santykis tarp vandens įgėrio po 60 min. ir vandens įgėrio pagal masę:

$$W_{60(s)} = \frac{W_{60}}{W_p}, \% \quad (3.4.6.)$$

Skaičiuojamas vidutinių porų dydžių rodiklis:

$$\lambda = \lambda_1 * \left(\frac{1}{a}\right) \quad (3.4.7.)$$

čia λ – vidutinių porų dydžių rodiklis;

λ_1 – porų pasiskirstymo pagal dydį rodiklis;

a – porų vienodumo rodiklis.

Bendras poringumas:

$$P_b = \left(1 - \left(\frac{\rho}{2690}\right)\right) * 100, \% \quad (3.4.8.)$$

čia P_b – bendras poringumas.

Atviras poringumas:

$$P_a = W_{p(t)}, \% \quad (3.4.9.)$$

čia P_a – atviras poringumas.

Uždaras poringumas:

$$W_p = P_p - P_a, \% \quad (3.4.10.)$$

Atsparumo šalčiui kriterijus:

$$K_{\xi} = \frac{P_u}{0,09 * P_a} \quad (3.4.11.)$$

čia K_{ξ} – atsparumo šalčiui kriterijus.

3.4.2 lentelė. Atviro ir uždaro poringumo bei atsparumo šalčiui kriterijaus skaičiavimai

<i>Bandinio nr.</i>	Bandinys su plastiko granulėmis		Bandinys su žvirgždu		Bandinys su keramzitu	
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Sauso bandinio masė, g	557,6	632,8	669,0	715,6	696,2	387,7
Masė po 15 min., g	585,4	653,7	699,0	748,6	750,2	417,7
Masė po 60 min., g	593,8	661,0	708,6	758,9	760,5	420,8
Masė po 24 val., g	614,9	681,2	714,4	762,5	763,5	424,8
Masė po 48 val., g	615,1	682,7	714,8	764,5	763,9	425,2
Bandinio vandenyje masė, g	314,5	355,8	408,2	436,3	366,5	186,2
W_p , %	10,31	7,89	6,85	6,83	9,72	9,67
W_p vidurkis, %	9,1		6,84		9,70	
Tankis ρ , kg/m ³	1855	1936	2182	2180	1752	1620
Vandens įgėris pagal tūrį $W_{p(t)}$, %	19,13	15,26	14,94	14,90	17,04	15,80
Vandens įgėris po 15 min. W_{15} , %	4,99	3,30	4,48	4,61	7,76	7,74
Vandens įgėris po 60 min. W_{60} , %	6,49	4,46	5,92	6,05	9,24	8,54
Bendras poringumas P_b , %	31,04	28,04	18,88	18,95	34,87	39,77
Atviras poringumas P_a , %	19,13	15,26	14,94	14,90	17,04	15,80
Uždaras poringumas P_u , %	11,91	12,77	3,95	4,05	17,84	23,98
Atsparumo šalčiui kriterijus K_{ξ}	6,92	9,30	2,94	3,02	11,63	16,86
K_{ξ} vidurkis	8,11		2,98		14,25	

Gaunama, kad didžiausias K_{ξ} yra betone su keramzitu– 14,25, mažiausias– betone su žvirgždu– 2,98. Betono su plastiko granulėmis K_{ξ} lygus 8,11. Nustatoma, kad betono su keramzitu atsparumo šalčiui ciklų skaičius yra lygus 1400 ciklų, betono su plastiko granulėmis– 1050 ciklų, betono su žvirgždu– 500 ciklų.

3.5. Atsparumo šalčiui nustatymas

Kapiliariniu įmirkimo atsparumo šalčiui nustatymas atliekamas betoniniams bandiniams su plastiko granulėmis žvirgždu bei keramzitu. Cilindriniai bandiniai sudedami į indą ir 1/3 bandinių aukščio užpilama 3% NaCl tirpalu. Tuomet, bandiniai patalpinti į CO₂ kamerą. Po 7 parų CO₂ kameroje matomi pirmieji betono pakitimai, bandiniai ištraukiami po 10 parų. Didžiausi irimo požymiai matomi betone su žvirgždu bei grynu plastikumu, betone su keramzitu matomi nedideli irimo požymiai, o betonas su plastiko granulėmis liko nepakitęs (3.5.1 pav.).



3.5.11 pav. Betoniniai bandiniai su žvirgždu, keramzitu, plastiko granulėmis ir grynu plastikumu po šildymo/šaldymo ciklą

Atsparumo šalčiui tyrimo metu nustatyta, kad betonas savo sudėtyje turintis plastiko granulių yra atspariausias cikliškam užšalimui ir atšilimui.

3.6. Betoninio blokelių gamyba

Parinkus racionaliausią betono sudėtį gaminami 2 rūšių betoniniai blokelių – su racionaliausiomis plastiko granulėmis bei su grynu plastikumu. Vieno blokelių gamybai paruošiamas 9 l betono mišinys, betonas supilamas į formą ir išardoma po 28 parų kietėjimo.

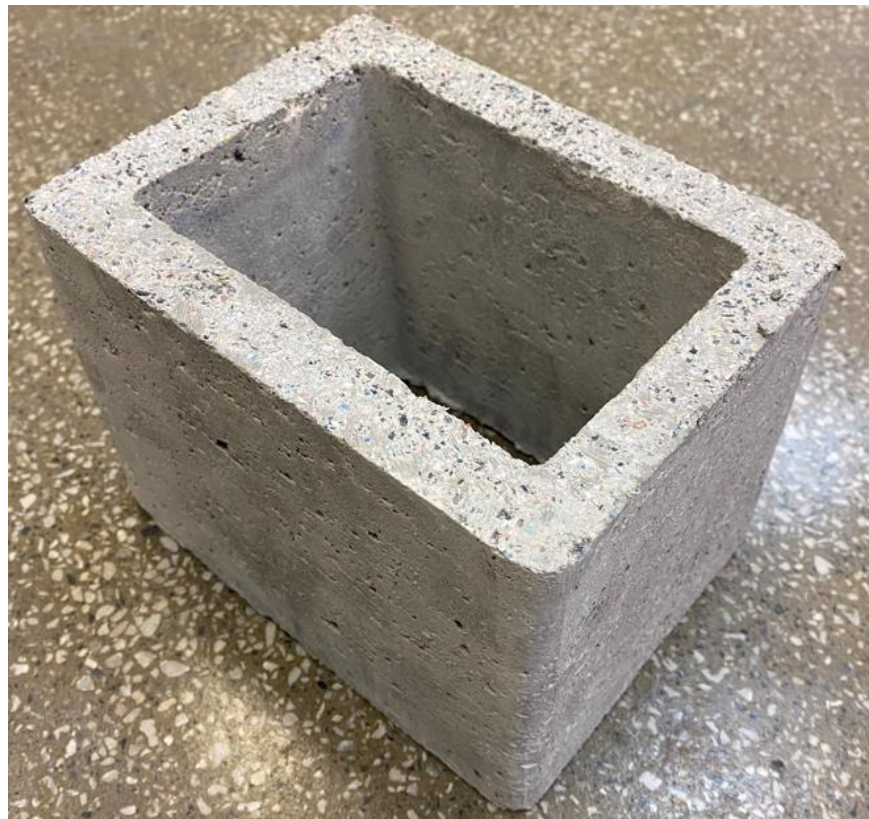
3.6.13 lentelė. Betono su plastiko granulėmis sudėtis

	1 m ³ betono	9 l betono
smėlis, kg	875	7,875
cementas, kg	200	1,8
vanduo, l	166,67	1,5
skalūniniai pelenai, kg	240	2,16
plastiko granulės, kg	333,34	3,0

Plastiko granulės naudotos III sudėties (3.1.3 lent.).



3.6.12 pav. Betoninis blokelis su grynomis plastiko atliekomis



3.6.13 pav. Betoninis blokelis su plastiko granulėmis

Išvados

1. Pagaminti skirtingų sudėčių plastiko užpildai. Atlikti užpildų stiprio nustatymo bandymai. Mažiausias stipris nustatytas I su PVA,K užpildų– 2,7 kN, didžiausias– II be PVA užpildų– 13,8 kN.
2. Betonų gamybai parinkti III sudėties užpildai (12,0 kN). Šių užpildų sudėtis ekologiškesnė– kaip rišiklis naudoti skalūniniai pelenai.
3. Siekiant gauti kuo stipresnį betoninį gaminį pagaminti 3 skirtingų sudėčių betoniniai bandiniai su plastiko granulėmis (III sudėties), dalis bandinių karbonizuoti CO₂ kameroje, norint dar labiau pagerinti stiprumines betono savybes. Mažiausias gniuždomasis stipris gautas karbonizuoto betono sudėtyje turinčio gryno plastiko (I,K-pl)– 0,63 MPa, didžiausias gniuždomasis stipris gautas III,K sudėties betono– 11,0 MPa.
4. Betoninio blokelių gamybai parinkta II,K betono sudėtis (10,5 MPa). Šio betono atsparumas gniuždomajam stipriui yra neženkliai mažesnis nei III,K betono (11,0 MPa), savo sudėtyje betonas turi ir daugiau atliekų– panaudoti skalūniniai pelenai.
5. Atsparumo šalčiui tyrimo metu nustatyta, kad betonas savo sudėtyje turintis plastiko granuliu yra atspariausias cikliškam užšalimui ir atšilimui.

Literatūros sąrašas

1. ABEYSUNDARA, U.G.Y., BABEL, S. and GHEEWALA, S. A Matrix in Life Cycle Perspective for Selecting Sustainable Materials for Buildings in Sri Lanka. *Building and Environment*, 2009, vol. 44, no. 5. pp. 997-1004. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132308001741> ISSN 0360-1323. DOI 10.1016/j.buildenv.2008.07.005.
2. BELMOKADDEM, M., MAHI, A., SENHADJI, Y. and PEKMEZCI, B.Y. Mechanical and Physical Properties and Morphology of Concrete Containing Plastic Waste as Aggregate. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 257. pp. 119559. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820315646> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.119559.
3. LEAL FILHO, W., et al. An Overview of the Problems Posed by Plastic Products and the Role of Extended Producer Responsibility in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 214. pp. 550-558. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618339799> ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.12.256.
4. *Plastics – the Facts 2016*. , 2015 Available from: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2016-Plastic-the-facts.pdf>.
5. ALQAHTANI, F.K., GHATAORA, G., KHAN, M.I. and DIRAR, S. Novel Lightweight Concrete Containing Manufactured Plastic Aggregate. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 148. pp. 386-397. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817308863> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.011.
6. THORNTON, J. Environmental Impacts of Polyvinyl Chloride (PVC) Building Materials. *Washington, DC: Healthy Building Network*, 2002.
7. VASSILIADOU, I., et al. Dioxin Contamination After an Accidental Fire in the Municipal Landfill of Tagarades, Thessaloniki, Greece. *Chemosphere*, 2009, vol. 74, no. 7. pp. 879-884. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653508014124> ISSN 0045-6535. DOI 10.1016/j.chemosphere.2008.11.016.
8. YADAV, I.S., KUMAR, M.G. and GOYAL, S.G. *Laboratory Investigations of the Properties of Concrete Containing Recycled Plastic Aggregates*. , 2008.
9. BABAREMU, K.O., et al. Sustainable Plastic Waste Management in a Circular Economy. *Heliyon*, 2022, vol. 8, no. 7. pp. e09984. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844022012725> ISSN 2405-8440. DOI 10.1016/j.heliyon.2022.e09984.
10. SUZUKI, G., et al. Mechanical Recycling of Plastic Waste as a Point Source of Microplastic Pollution. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 303. pp. 119114. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749122003281> ISSN 0269-7491. DOI 10.1016/j.envpol.2022.119114.
11. JIANG, J., et al. From Plastic Waste to Wealth using Chemical Recycling: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, no. 1. pp. 106867. Available from:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343721018443> ISSN 2213-3437. DOI 10.1016/j.jece.2021.106867.

12. AWOYERA, P.O. and ADESINA, A. Plastic Wastes to Construction Products: Status, Limitations and Future Perspective. *Case Studies in Construction Materials*, 2020, vol. 12. pp. e00330. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509520300024> ISSN 2214-5095. DOI 10.1016/j.cscm.2020.e00330.

13. KAMARUDDIN, M.A., ABDULLAH, M.M.A., ZAWAWI, M.H. and Zainol, M R R A. *Potential use of Plastic Waste as Construction Materials: Recent Progress and Future Prospect*. IOP Publishing, 2017 ISBN 1757-8981. DOI 10.1088/1757-899x/267/1/012011.

14. LAMBA, P., KAUR, D.P., RAJ, S. and SOROUT, J. Recycling/Reuse of Plastic Waste as Construction Material for Sustainable Development: A Review. *Environmental Science and Pollution Research International*, Dec 01, 2022, vol. 29, no. 57. pp. 86156-86179. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16980-y> MEDLINE. ISSN 0944-1344. DOI 10.1007/s11356-021-16980-y.

15. YANG, Y., et al. Recycling of Composite Materials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2012, vol. 51. pp. 53-68. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270111002029> ISSN 0255-2701. DOI 10.1016/j.cep.2011.09.007.

16. KAZEMI NAJAFI, S. Use of Recycled Plastics in Wood Plastic Composites – A Review. *Waste Management*, 2013, vol. 33, no. 9. pp. 1898-1905. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1300247X> ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2013.05.017.

17. POONYAKAN, A., RACHAKORNKIJ, M., WECHARATANA, M. and SMITTAKORN, W. *Potential use of Plastic Wastes for Low Thermal Conductivity Concrete*. MDPI AG, -10-11, 2018 DOI 10.3390/ma11101938.

18. KUMI-LARBI, A., et al. Recycling Waste Plastics in Developing Countries: Use of Low-Density Polyethylene Water Sachets to Form Plastic Bonded Sand Blocks. *Waste Management (Elmsford)*, Oct 01, 2018, vol. 80. pp. 112-118. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.003> MEDLINE. ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2018.09.003.

19. STEYN, Z.C., BABAFEMI, A.J., FATAAR, H. and COMBRINCK, R. Concrete Containing Waste Recycled Glass, Plastic and Rubber as Sand Replacement. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 269. pp. 121242. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820332463> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.121242.

20. Dr J L Clarke. *Structural Lightweight Aggregate Concrete*. 1st Edition ed. Taylor & Francis, 1993.

21. CHANDRA, S. and BERNTSSON, L. *Lightweight Aggregate Concrete*. United States of America: Noyes Publications / William Andrew Publishing ISBN 0-8155-1486-7.

22. NADESAN, M.S. and DINAKAR, P. Influence of Type of Binder on High-Performance Sintered Fly Ash Lightweight Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 2018, vol.

176. pp. 665-675. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818311231> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.057.
23. GAO, Y., CHENG, L., GAO, Z. and GUO, S. Effects of Different Mineral Admixtures on Carbonation Resistance of Lightweight Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 43. pp. 506-510. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813001669> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.038.
24. MAJHI, R.K., PADHY, A. and NAYAK, A.N. Performance of Structural Lightweight Concrete Produced by Utilizing High Volume of Fly Ash Cenosphere and Sintered Fly Ash Aggregate with Silica Fume. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, vol. 3. pp. 100121. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821000811> ISSN 2666-7908. DOI 10.1016/j.clet.2021.100121.
25. BAKHSHI, M., DALALBASHI, A. and SOHEILI, H. Energy Dissipation Capacity of an Optimized Structural Lightweight Perlite Concrete. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 389. pp. 131765. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823014782> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.131765.
26. Muhtar. Performance-Based Experimental Study into Quality Zones of Lightweight Concrete using Pumice Aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 18. pp. e01960. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523001390> ISSN 2214-5095. DOI 10.1016/j.cscm.2023.e01960.
27. SARIDEMIR, M. and ÇELIKTEN, S. Investigation of Fire and Chemical Effects on the Properties of Alkali-Activated Lightweight Concretes Produced with Basaltic Pumice Aggregate. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 260. pp. 119969. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820319747> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.119969.
28. LAZORENKO, G., KASPRZHITSKII, A. and FINI, E.H. Polyethylene Terephthalate (PET) Waste Plastic as Natural Aggregate Replacement in Geopolymer Mortar Production. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 375. pp. 134083. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622036551> ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2022.134083.
29. HANUSEAC, L., et al. Eco-Mechanical Index of Lightweight Concrete Mixtures with Recycled Materials. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 46. pp. 667-674. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920309732> ISSN 2351-9789. DOI 10.1016/j.promfg.2020.03.095.
30. EZIEFULA, U.G., EZEH, J.C. and EZIEFULA, B.I. Properties of Seashell Aggregate Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 192. pp. 287-300. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818325030> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.096.
31. PRUSTY, J.K. and PATRO, S.K. Properties of Fresh and Hardened Concrete using Agro-Waste as Partial Replacement of Coarse Aggregate – A Review. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 82. pp. 101-113. Available from:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815002147> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.063.
32. KOKSAL, F., GENCEL, O. and KAYA, M. Combined Effect of Silica Fume and Expanded Vermiculite on Properties of Lightweight Mortars at Ambient and Elevated Temperatures. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 88. pp. 175-187. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815004559> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.021.
33. RAHMANI, E., et al. On the Mechanical Properties of Concrete Containing Waste PET Particles. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 47. pp. 1302-1308. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181300559X> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.
34. SAIKIA, N. and DE BRITO, J. Mechanical Properties and Abrasion Behaviour of Concrete Containing Shredded PET Bottle Waste as a Partial Substitution of Natural Aggregate. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 52. pp. 236-244. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813010817> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.
35. KAUR, G. and PAVIA, S. Physical Properties and Microstructure of Plastic Aggregate Mortars made with Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), Polycarbonate (PC), Polyoxymethylene (POM) and ABS/PC Blend Waste. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 31. pp. 101341. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219321072> ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.jobbe.2020.101341.
36. SAIKIA, N. and DE BRITO, J. Mechanical Properties and Abrasion Behaviour of Concrete Containing Shredded PET Bottle Waste as a Partial Substitution of Natural Aggregate. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 52. pp. 236-244. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813010817> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.
37. TEJAS, S. and PASLA, D. Assessment of Mechanical and Durability Properties of Composite Cement-Based Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 387. pp. 131620. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823013338> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.131620.
38. NARAN, J.M., et al. Incorporating Waste to Develop Environmentally-Friendly Concrete Mixes. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 314. pp. 125599. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821033365> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.125599.
39. SAU, D., SHIULY, A. and HAZRA, T. Study on Green Concrete Replacing Natural Fine and Coarse Aggregate by Plastic Waste – an Experimental and Machine Learning Approach. *Materials Today: Proceedings*, 2023. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532302103X> ISSN 2214-7853. DOI 10.1016/j.matpr.2023.04.207.
40. COLANGELO, F., CIOFFI, R., LIGUORI, B. and IUCOLANO, F. Recycled Polyolefins Waste as Aggregates for Lightweight Concrete. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 106. pp. 234-241. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816307624> ISSN 1359-8368. DOI 10.1016/j.compositesb.2016.09.041.

41. AKÇAÖZOĞLU, S., ATIŞ, C.D. and AKÇAÖZOĞLU, K. An Investigation on the use of Shredded Waste PET Bottles as Aggregate in Lightweight Concrete. *Waste Management*, 2010, vol. 30, no. 2. pp. 285-290. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09003870> ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2009.09.033.
42. ARULRAJAH, A., et al. Stiffness and Flexural Strength Evaluation of Cement Stabilized PET Blends with Demolition Wastes. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 239. pp. 117819. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819332726> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.117819.
43. YESILATA, B., ISIKER, Y. and TURGUT, P. Thermal Insulation Enhancement in Concretes by Adding Waste PET and Rubber Pieces. *Construction and Building Materials*, 2009, vol. 23, no. 5. pp. 1878-1882. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808002808> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014.
44. ISLAM, M.J., SHAHJALAL, M. and HAQUE, N.M.A. Mechanical and Durability Properties of Concrete with Recycled Polypropylene Waste Plastic as a Partial Replacement of Coarse Aggregate. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 54. pp. 104597. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222006106> ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.jobe.2022.104597.
45. GUO, S., et al. Mechanical Test and Constitutive Model of Recycled Plastic Fiber Reinforced Recycled Concrete. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 348. pp. 128578. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822022371> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.128578.
46. SPÓSITO, F.A., et al. Incorporation of PET Wastes in Rendering Mortars Based on Portland Cement/Hydrated Lime. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 32. pp. 101506. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220302977> ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.jobe.2020.101506.
47. HITA, P.R., PÉREZ-GÁLVEZ, F., MORALES-CONDE, M.J. and PEDREÑO-ROJAS, M.A. Reuse of Plastic Waste of Mixed Polypropylene as Aggregate in Mortars for the Manufacture of Pieces for Restoring Jack Arch Floors with Timber Beams. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 198. pp. 1515-1525. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618320389> ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.07.065.
48. MAKRI, C., HAHLADAKIS, J.N. and GIDARAKOS, E. Use and Assessment of “e-Plastics” as Recycled Aggregates in Cement Mortar. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, vol. 379. pp. 120776. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389419307186> ISSN 0304-3894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2019.120776.
49. COPPOLA, B., et al. Investigation on the use of Foamed Plastic Waste as Natural Aggregates Replacement in Lightweight Mortar. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 99. pp. 75-83. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816308514> ISSN 1359-8368. DOI 10.1016/j.compositesb.2016.05.058.
50. ZULKERNAIN, N.H., GANI, P., CHUCK CHUAN, N. and UVARAJAN, T. Utilisation of Plastic Waste as Aggregate in Construction Materials: A Review. *Construction and Building*

Materials, 2021, vol. 296. pp. 123669. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182101429X> ISSN 0950-0618. DOI
10.1016/j.conbuildmat.2021.123669.

51. SAIKIA, N. and DE BRITO, J. Mechanical Properties and Abrasion Behaviour of Concrete Containing Shredded PET Bottle Waste as a Partial Substitution of Natural Aggregate. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 52. pp. 236-244. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813010817> ISSN 0950-0618. DOI
10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.

52. HOSSAIN, M., BHOWMIK, P. and SHAAD, K. Use of Waste Plastic Aggregation in Concrete as a Constituent Material. *Progressive Agriculture (Mymensingh, Bangladesh)*, Dec 28, 2016, vol. 27, no. 3. pp. 383-391 CrossRef. ISSN 1017-8139. DOI 10.3329/pa.v27i3.30835.

53. THIAM, M. and FALL, M. Mechanical, Physical and Microstructural Properties of a Mortar with Melted Plastic Waste Binder. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 302. pp. 124190. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821019504> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.124190.