



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Plastiko atliekų panaudojimas statybos produktų gamyboje,
savybių tyrimai ir technologija**

Baigiamasis magistro projektas

Edvinas Benašas
Projekto autorius

Dr. Evaldas Šerelis
Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Plastiko atliekų panaudojimas statybos produktų gamyboje,
savybių tyrimai ir technologija**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Edvinas Benašas
Projekto autorius

Dr. Evaldas Šerelis
Vadovas

Mindaugas Daukšys
Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Edvinas Benašas

Plastiko atliekų panaudojimas statybos produktų gamyboje, savybių tyrimai ir technologija

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Edvino Benašo, baigiamasis projektas tema „Plastiko atliekų panaudojimas statybos produktų gamyboje, savybių tyrimai ir technologija“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Santrumpos:

PE – polietilenas;
PP – polipropilenas;
PVC – polivinilchloridas;
PS – polistirenas;
PET – polietileno tereftalatas;
HDPE – didelio tankio polietilenas;
LDPE – mažo tankio polietilenas;
DT – darbo temperatūra;
LT – lydymosi temperatūra;
PKA – plastiko kietosios atliekos;
KKA – kietosios komunalinės atliekos;
V/C – vandens ir cemento santykis;
WPC – medžio-plastiko kompozitas.

Plastiko savybes nusakantys simboliai:

HB – kietumas pagal Brinelį;
E – tamprumo modulis;
 σ – įtempis;
 ϵ – santykinis trūkstamasis pailgėjimas;
 ρ - tankis.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
IVADAS	12
1. LITERATŪROS ANALIZĖ	14
1.1. Plastiko atliekų problematika pasaulyje ir Lietuvoje.....	14
1.1.1. Susidarantys plastiko atliekų kiekiai	14
1.1.2. Perdirbto plastiko atliekų panaudojimo galimybės	16
1.1.3. Perdirbimo sunkumai.....	19
1.2. Plastiko rūšys, sandara ir savybės	20
1.2.1. Plastiko rūšys.....	20
1.2.2. Plastiko sandara ir savybės	21
1.3. Perdirbto plastiko mechaninių savybių tyrimai ir perdirbimo technologija	24
1.3.1. Bandinių iš HDPE/LDPE/PP plastikų mišinio formavimo technologija ir mechaninės savybės	24
1.3.2. Medžio-plastiko kompozitų savybės, naudojant perdirbtą arba gryną plastiką.....	25
1.3.3. Mažo tankio polietileno (LDPE) vandens maišelių ir smėlio mišinio bandinių tyrimai ir technologija	26
1.3.4. Plastiko atliekos asfaltbetonyje	28
1.3.5. Plastiko, kaip užpildo, naudojimas betone	30
1.3.6. Plastiko ir betono nuovargio tyrimai	31
1.4. Literatūros analizės išvados ir išsikeliami uždaviniai.....	33
2. TYRIMAMS NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI	35
2.1. Tyrimuose naudotos medžiagos.....	35
2.2. Tyrimų metodai.....	37
3. EKSPERIMENTINĖ DALIS	42
3.1. Perdirbamo plastiko žaliavos paruošimo technologija	42
3.2. Kontrolinė HDPE plastiko perdirbimo technologija.....	43
3.3. Pakoreguota HDPE plastiko perdirbimo technologija.....	45

3.4. Sukurti bandiniai	47
3.5. Tankio nustatymas	47
3.6. Stiprio gniuždant nustatymas	48
3.7. Stiprio lenkiant nustatymas	51
3.8. Ypač lengvo betono su HDPE plastiko granulėmis savybės	54
IŠVADOS	56
LITERATŪROS SĄRAŠAS	57

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1.1 pav. Plastiko atliekų rodikliai Europoje (PlasticsEurope ir kt., 2015).....	15
1.1.2 pav. Plastiko atliekų ir jų sutvarkomos dalies kiekis (sudaryta autoriaus, remiantis Aplinkos apsaugos agentūros duomenimis).....	16
1.1.3 pav. Plastiko atliekų panaudojimas: a) Medžio-plastiko kompozitai; b) Plastiką, kaip užpildą betone; c) Poliprolinines fibras; d) Asfaltbetonis; e) Stogo elementai; f) Blokeliai (sudaryta autoriaus).....	17
1.1.4 pav. Plastiko atliekų perdirbimo į kurą schema (sudaryta autoriaus, remiantis Sharuddin ir kt. duomenimis, 2017).....	18
1.1.5 pav. Polimerinių medžiagų gyvavimo ciklas (PlasticsEurope ir kt., 2015).....	18
1.1.6 pav. Mechaninio perdirbimo schema (Aznar ir kt., 2006).....	20
1.2.1 pav. SEM nuotrauka. PP/PET mišinio bandinio paviršius (a) ir gryno HDPE bandinio paviršius (b) (Ragaert ir kt., 2017; Grigoriadou ir kt., 2017).....	23
1.2.2 pav. Mūro mišinio su HDPE plastiko užpildu (a) ir mūro mišinio su smėlio užpildu (b) SEM nuotrauka.....	23
1.3.1 pav. Stiprio gniuždant bandymo rezultatai ir bandinių suirimo pobūdis (Bajracharya ir kt., 2015).....	24
1.3.2 pav. Lenkimo bandymo rezultatai ir bandinių suirimo pobūdis (Bajracharya ir kt., 2015).....	25
1.3.3 pav. Kompozitų smūginis atsparumas ir galutinė kaina (Keskisaari ir kt., 2018).....	26
1.3.4 pav. LDPE-smėlio mišinio bandinių paruošimo technologija (Kumi-Larbi ir kt., 2018).....	27
1.3.5 pav. Smėlio ir plastiko santykio įtaka bandinių gniuždomajam stipriui (Kumi-Larbi ir kt., 2018).....	28
1.3.6 pav. Stabilumo priklausomybė nuo Maišymo temperatūros / Maišymo turkmės (Agar ir kiti, 2003).....	29
1.3.7 pav. Betono su plastiko atliekomis, pakeičiant smulkų užpildą, stipris gniuždant (Saxena ir kt., 2018).....	30
1.3.8 pav. Betono, su plastiko atliekomis, kaip smulkiu užpildu, gniuždomasis stipris, veikiant aukštai temperatūrai (Saxena ir kt., 2018).....	31
1.3.9 pav. Betoninių sijų su įpjovomis bandiniai: maža sija, vidutinė sija, didelė sija (Keerthana ir kt., 2018).....	32
1.3.10 pav. Plyšio pločio-ciklą skaičiaus kreivės mažai(a), vidutinei (b) ir didelei (c) betoninei sijai (Keerthana ir kt., 2018).....	32

1.3.11 pav. Įlinkio-ciklų skaičiaus kreivės. Medžiagos: a) PE100, b) HDPE-M, c) HDPE-R, d) HDPE-P (Alzerreca ir kiti, 2015)	33
2.1.1 pav. Tyrimuose naudotos didelio tankio polietileno (HDPE) plastiko granulės.....	35
2.1.2 pav. Devulkanizuota padangų guma	35
2.1.3 pav. Cemento granuliometrinė kreivė	37
2.2.1 pav. „Toni Technik“ hidraulinis presas, stiprio gniuždant bandymams	38
2.2.2 pav. „Toni Technik“ hidraulinis presas, stiprio lenkiant bandymams	39
2.2.3 pav. Besiplečiantis ypač lengvo betono mišinys formoje	41
3.1.1 pav. Perdirbamo plastiko žaliavos paruošimo technologija (sudaryta autoriaus)	42
3.2.1 pav. Kontrolinė plastiko perdirbimo procedūra	43
3.2.2 pav. Kontrolinio bandinio paviršius	44
3.2.3 pav. Kontrolinio bandinio skerspjūvis	44
3.3.1 pav. Pakoreguota plastiko perdirbimo technologija.....	45
3.3.2 pav. Kontrolinės technologijos bandinys (a) ir pakoreguotos technologijos bandinys (b)	46
3.4.1 pav. Tyrimuose naudojamo bandinių skerspjūviai.....	47
3.6.1 pav. HDPE100 kubelis prieš (a) ir po (b) stiprio gniuždant bandymo.....	48
3.6.2 pav. HDPE70DPG30 bandinio skerspjūvis	49
3.6.3 pav. HDPE70DPG30 bandinys prieš (a) ir po (b) stiprio gniuždant bandymo	49
3.6.4 pav. HDPE85SM15 bandinių skerspjūvis.....	50
3.6.5 pav. HDPE85SM15 bandiniai prieš (a) ir po (b) stiprio gniuždant bandymo.....	50
3.6.6 pav. Stiprio gniuždant bandymų įtempimų-deformacijų kreivės	50
3.7.1 pav. HDPE100 prizmė, po stiprio lenkiant bandymo	51
3.7.2 pav. HDPE70DPG30 prizmė, po stiprio lenkiant bandymo	52
3.7.3 pav. HDPE85SM15 prizmė, po stiprio lenkiant bandymo.....	52
3.7.4 pav. Stiprio lenkiant bandymų įtempimų-įlinkio kreivės.....	53
3.8.1 pav. Ypač lengvo betono mišinio bandinys be plastiko granulių (a) ir su plastiko granulėmis (b)	54
3.8.2 pav. Įtrūkimai ypač lengvo betono su plastiko granulėmis bandinyje	55

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1.1 lentelė. Plastiko tipai ir kiekiai JAV komunalinėse atliekose 2010 m. (EPA, 2011).....	15
1.2.1 lentelė. Plastiko kodavimo sistema ir panaudojimas (So ir kt., 2014).....	21
1.2.2 lentelė. Polimerų grandžių tipai (www.umich.edu)	22
1.2.3 lentelė. Kai kurių termoplastikų fizikinės-mechaninės savybės (Kizinievič ir Žurauskienė, 2012).....	22
1.3.1 lentelė. HDPE-medžio pudros kompozitų tempimo ir lenkimo savybės (Adhikary ir kt., 2007)	26
1.3.2 lentelė. Bitumo-plastiko mišinio parametrai (Nkanga ir kt., 2017)	29
2.1.1 lentelė. Cheminė cemento sudėtis (Vaitkevičius ir kt., 2018).....	37
2.2.1 lentelė. HDPE ir DPG mišinio 1 m ³ sudėtis.....	40
2.2.2 lentelė. HDPE ir smėlio mišinio 1 m ³ sudėtis	40
2.2.3 lentelė. Ypač lengvo betono su plastiko granulėmis mišinio sudėtis.....	40
2.2.4 lentelė. Ypač lengvo betono su plastiko granulėmis maišymo procedūra	41
3.2.1 lentelė. Kontrolinio bandinio prizmių tankis	44
3.5.1 lentelė. Bandinių tankiai	47
3.7.1 lentelė. Bandinių stiprio lenkiant bandymo rezultatai	53

Benašas, Edvinas. Plastiko atliekų panaudojimas statybos produktų gamyboje, savybių tyrimai ir technologija. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Evaldas Šerelis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Technologijos mokslai, Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija

Reikšminiai žodžiai: plastiko atliekos, perdirbimas, mechaninės savybės, didelio tankio polietilenas, HDPE, devulkanizuota padangų guma, ypač lengvas betonas.

Kaunas, 2018. 60 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame projekte tiriamos perdirbto didelio tankio polietileno (HDPE) plastiko atliekų savybės ir elgsena, aiškinamasi, kaip paprasčiau ir efektyviau atlikti perdirbimo technologinį procesą.

Baigiamasis projektas susideda iš dviejų pagrindinių dalių: literatūros analizės ir eksperimentinės dalies.

Literatūros analizėje yra apžvelgiama plastiko atliekų problema pasaulyje ir Lietuvoje. Aptariamos plastiko atliekų perdirbimo ir panaudojimo galimybės bei su kokiais sunkumais tenka susidurti, norint atliekas perdirbti. Taip pat, apžvelgiami atlikti tyrimai, nagrinėjantys plastiko atliekų mechanines, fizikines, chemines savybes ir perdirbimo technologijas.

Eksperimentinėje dalyje aprašomos plastiko atliekų perdirbimo technologijos, naudotos ruošiant plastiko žaliavą ir kuriant bandinius. Dar, šioje dalyje pateikiami gauti rezultatai, atlikus bandinių stiprio gniuždant, lenkiant bandymus, pateikiamos bandinių fizikinės savybės. Apžvelgiama plastiko bandinių elgsena ir požymiai, kai bandinys susidaro tik iš plastiko arba plastiko ir devulkanizuotos padangų gumos ar smėlio mišinio. Buvo ištirta HDPE plastiko granulių elgsena ypač lengvo betono mišinio bandiniuose.

Benašas, Edvinas. Waste plastic utilisation in the manufacture of building materials, properties research and technology. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. dr. Evaldas Šerelis; Department of civil engineering and architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Technology sciences, Structural and building products engineering

Keywords: waste plastic, recycling, mechanical properties, high-density polyethylene, HDPE, devulcanized tire rubber, ultra-lightweight concrete.

Kaunas, 2018. 60 pages.

Summary

In this master's degree final project high-density polyethylene (HDPE) waste plastic properties and behavior are being examined. Also, it is being investigated, how to make recycling process easy and effective.

Final project consists of two main sections: literature review and experimental study.

In literature review, waste plastic problem around the world and in Lithuania is overviewed. It is discussed, what recycling technologies can be applied, where plastic waste can be used and what difficulties are being encountered in recycling process. Also, carried out studies about plastic waste mechanical, chemical, physical properties and recycling technologies are reviewed.

In experimental study section, recycling technologies, that were used to create recycled plastic raw material and specimens is shown. Also, in this section, results of specimen compressive and flexural strength tests and physical properties of specimen's are presented. Plastic specimen behavior and properties, when specimens were only from recycled plastic material or from plastic and devulcanized tire rubber or sand mixture, were analyzed. HDPE plastic pellet behavior in ultra-lightweight concrete mixture was also analyzed.

IVADAS

Temos aktualumas

Plastikas yra plačiausiai naudojama žmonių sukurta medžiaga pasaulyje, dėl jo specifinių charakteristikų, tokių kaip lengvas gamybos procesas, lengva formavimas, žema kaina ir mažas tankis. Ši medžiaga ypač naudinga tokiose srityse, kaip medicinos, architektūros, statybos ir transporto (Seghiri ir kt., 2017). Dėl plataus panaudojimo spektro plastiko atliekų kiekis nuolatos auga. 2014-aisiais pasaulyje buvo sugeneruota 313 milijonų tonų plastiko atliekų, 2015-aisiais šis skaičius išaugo iki 322 milijonų tonų, t. y. maždaug 3 % prieaugis per du metus. Europoje 2014-aisiais plastiko atliekos sudarė 59 milijonus tonų, iš kurių pusė buvo išmesta į sąvartynus. Pagal 2014-ųjų metų duomenis, Europoje buvo perdirbti 29,7 % atliekų, o Jungtinėse Amerikos Valstijose, tik 8,8 % (Alqahtani ir kt., 2017).

Dėl didžiulio plastiko atliekų kiekio išmetamo gamtoje ir plastiko ilgaamžiškumo iškyla labai opi aplinkosaugos problema (Seghiri ir kt., 2017). Kylantis susirūpinimas aplinkosauga, tinkamų sąvartynams plotų trūkumas, didėjanti sąvartynų išlaikymo kaina verčia ieškoti plastiko atliekų panaudojimo galimybių (Siddique ir kt., 2007). Perdirbant plastiko atliekas būtų sumažinamas aplinkosauginės problemos mastas, naudojant perdirbtą plastiką, būtų sunaudojama mažiau gryno plastiko žaliavos (Reis ir kt., 2014).

Pastaruosiu metu yra atliekama vis daugiau tyrimų, kaip efektyviai perdirbti plastiko atliekas ir kaip jas galima panaudoti. Šiuo metu plastiko atliekos gali būti naudojamos kuriant naujus plastiko produktus, tokius kaip: tara, dubenėliai, žaislai, dėžutės. Tačiau esant ypatingai dideliame plastiko atliekų kiekiui viena industrija negali perdirbti visų atliekų, todėl reikia plėsti perdirbimo galimybių spektrą.

Vis dažniau bandoma plastiko atliekas integruoti į statybos produktų gamybą. Šiuo metu plastiko atliekos naudojamos gaminant medžio-plastiko kompozitines medžiagas, asfaltbetonį, armavimo plaušą, norima integruoti plastiko atliekas į betonų gamybą.

Nors ieškoma plastiko panaudojimo ir perdirbimo būdų, bet atliekamų tyrimų skaičius susijęs su šia problema nėra didelis, dėl to atsiranda informacijos stoka, apie šios medžiagos perdirbimo galimybes ir savybes.

Darbo tikslas ir uždaviniai:

Darbo tikslas – sukurti plastiko perdirbimo technologiją bei ištirti pagrindines fizikines ir mechanines savybes.

Darbo uždaviniai:

1. Panaudojant vietines plastiko atliekas sukurti efektyvų perdirbimo technologinį procesą.
2. Ištirti suformuotų bandinių pagrindines fizikines ir mechanines savybes.
3. Sukurti ypač lengvo betono mišinį su plastiko granulėmis ir ištirti suformuotų bandinių mechanines savybes.

Mokslinis naujumas

Sukurta plastiko perdirbimo technologija ir ištirtos didelio tankio polietileno (HDPE) plastiko mechaninės ir fizikinės savybės ir kitų medžiagų įtaka šioms savybėms, kuriant kompozitines medžiagas.

Praktinė vertė

Sukaupta informacija apie didelio tankio polietileno elgseną, savybes ir perdirbimo technologiją, ateityje leis geriau pažinti šią medžiagą, norint ją pritaikyti statybos produktų gamyboje.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

1.1. Plastiko atliekų problematika pasaulyje ir Lietuvoje

1.1.1. Susidarantys plastiko atliekų kiekiai

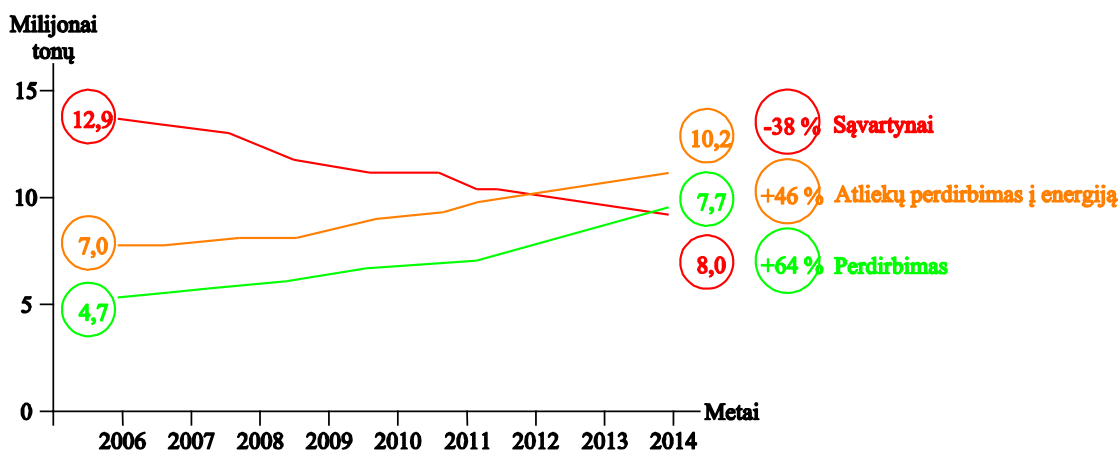
Plastikas tapo neatsiejama mūsų gyvenimo dalis. Kasmet sunaudojamas plastiko kiekis vis auga dėl jo mažo tankio, stiprumo, patogaus dizaino, gamybos galimybių, ilgaamžiškumo, lengvumo bei kainos. Plastiką naudojamas pakuotėse, autotransporto inžinerijoje (automobilių bei motociklų dalių gamyboje), industrinėse sistemose, medicinos sistemose, dirbtiniuose implantuose, įvairiose sveikatos priežiūros programose, vandens nudurkinimui, žemės / dirvožemio išsaugojimui, komunikacijos priemonėms, apsaugos sistemoms ir daugybei kitų. Esant tokioms didelėms panaudojimo galimybėms, kiekvienais metais plastiko atliekų kiekis vis didėja kietųjų atliekų sraute (Franklin Associate Ltd., 1998).

Pavyzdžiui, 2008 metais Australijoje susidarė 14 milijonų tonų mišrių komunalinių atliekų (MKA), iš kurių 16% buvo plastiko atliekos (DSEWPC, 2012). Tais pačiais metais Jungtinėje Karalystėje susidarė 32 milijonai tonų MKA, iš kurių 3,2 milijono tonų buvo plastiko atliekos (DEFRA, 2011). Jungtinėse Amerikos Valstijose 2012 metais plastiko atliekos sudarė 31,75 milijonus tonų, t. y. 40 % daugiau nei 1998 (EPA, 2013).

Per metus Europoje yra sugeneruojama maždaug 25 milijonai tonų vartotojų atliekų (PlasticsEurope ir kt., 2015). 2014-aisiais metais, 29,7 % atliekų buvo efektyviai perdirbtos, 39,5 % panaudotos energijai gaminti, o likusi 30,8 % dalis buvo išmesta į sąvartynus (Ragaert ir kt., 2017).

Plastiko atliekų problema taip pat labai aktuali ir Lietuvoje. Kaip ir kitose pasaulio šalyse, augant plastiko panaudojimo galimybėms, taip pat auga ir atliekų kiekis. Lietuvoje 2006 metais plastiko atliekų kiekis buvo 57 tūkst. tonų, o 2016 metais, pasiekė 66 tūkst. tonų (www.atliekos.gamta.lt).

Per praėjusį dešimtmetį Europoje perdirbimo bei atliekų panaudojimo energijos gamybai rodikliai stabiliai kilo, todėl gerokai sumažėjo atliekų išmetimas į sąvartynus, tai galima matyti 1.1.1 paveikslėlyje.



1.1.1 pav. Plastiko atliekų rodikliai Europoje (PlasticsEurope ir kt., 2015).

Europoje rodikliai susiję su atliekų perdirbimu kyla, bet rodikliai susiję su sąvartynais įvairiose Europos šalyse pasiskirstę labai netolygiai. Šalyse, kuriose veikia įvairūs sąvartynų draudimai (Belgija, Liuksemburgas, Olandija, Vokietija, Danija, Šveicarija, Austrija, Norvegija ir Švedija), mažiau nei 10% plastiko atliekų yra išmetamos į sąvartynus. Kitose šalyse, tokiose kaip Ispanija, Graikija, daugiau nei 50% plastiko atliekų vis dar yra išmetamos į sąvartynus (PlasticsEurope ir kt., 2015).

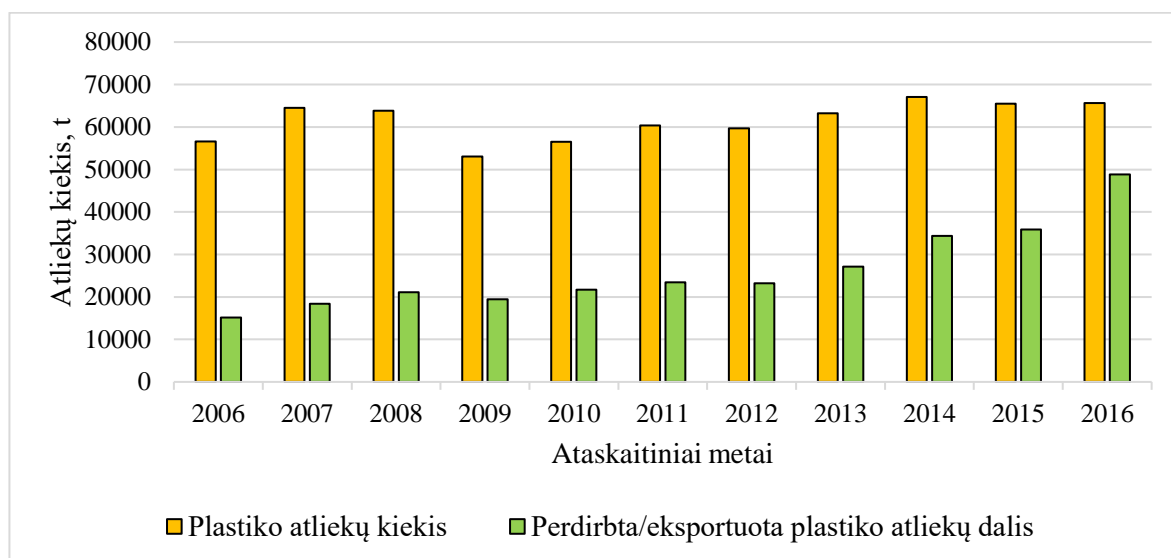
Nors Europoje atliekų perdirbimo situacija gerėja, tačiau lyginant situaciją su Jungtinėmis Amerikos Valstijomis galima matyti, jog tik nedidelė dalis atliekų yra perdirbama. 2010-aisiais metais perdirbta buvo tik 7,6% iš 31 milijono tonų plastiko atliekų, tai galima matyti 1.1.1 lentelėje.

1.1.1 lentelė. Plastiko tipai ir kiekiai JAV komunalinėse atliekose 2010 m. (EPA, 2011)

Plastiko tipas	Atliekų kiekis		Perdirbama	
	1000 t	proc.	1000 t	dalis visame kiekyje, proc.
PET	3980	12,82	560	14,07
HDPE	5450	17,56	570	10,46
PVC	910	2,93	-	-
LDPE/LLDPE	7430	23,94	420	5,65
PLA	50	0,16	-	-
PP	7530	24,26	60	0,80
PS	2060	6,64	20	0,97
Kitos dervos	3630	11,69	730	20,11
Viso	31040	100,00	2360	7,60

Lietuvoje 2006 metais buvo perdirbta arba eksportuota tik 26,7 % plastiko atliekų iš 57 tūkst. tonų, 2015 metais panaudojimo procentas išaugo iki 54,8 % (Aplinkos apsaugos agentūra, 2017). 1.1.2 paveikslėlyje pateikiami duomenys, kaip kiekvienais metais Lietuvoje kito plastiko atliekų susidarymo ir susidariusių atliekų perdirbimo kiekiai. Taip pat paveikslėlyje galima matyti, kad 2016

metais plastiko sutvarkymo kiekis padidėjo net iki 74,4%, tokį plastiko perdirbimo prieaugį galėjo lemti 2016 metais Lietuvoje įvesta vienkartinų gėrimų pakuočių užstato sistema. Kadangi nemažą dalį plastiko atliekų sudaro polietileno tereftalato (PET) plastikas, dėl sistemos didžioji jo dalis gražinama perdirbimui.



1.1.2 pav. Plastiko atliekų ir jų sutvarkomos dalies kiekis (sudaryta autoriaus, remiantis Aplinkos apsaugos agentūros duomenimis).

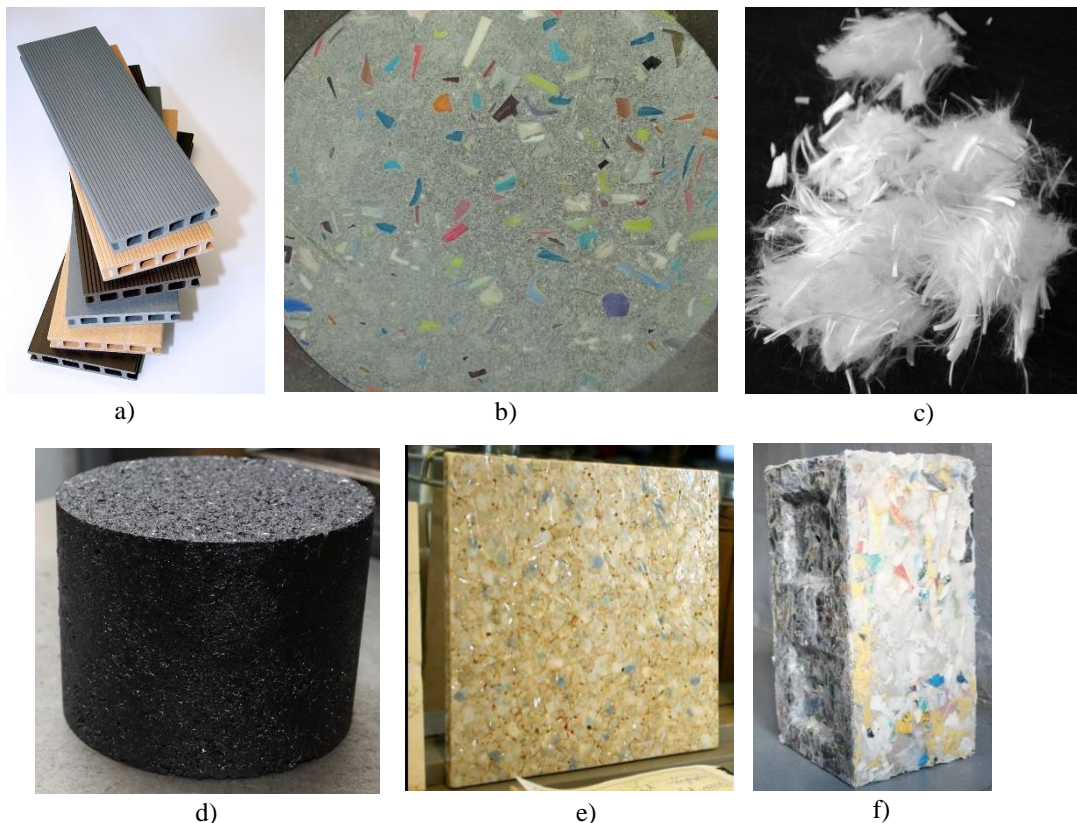
1.1.2. Perdirbto plastiko atliekų panaudojimo galimybės

Esant tokiam plastiko atliekų augimui, iškyla kitos didelio masto problemos, kaip su šiomis atliekomis susitvarkyti. Didžioji dalis atliekų gabenama į sąvartynus, pavyzdžiui, Jungtinėse Valstijose ta dalis sudarė net 80% (EPA, 2003). Lietuvoje į sąvartynus išvežama apie 60% atliekų (www.atliekos.gamta.lt). Atliekų kiekiui vis augant, auga ir sąvartynų plotai. Tai daro didžiulę žalą gamtai.

Norint mažinti šios problemos mastą galima atliekas perdirbti, taip sumažinant atliekų kiekį ir aplinkosaugines problemas. Taip pat, perdirbant atliekas taupoma energija, kuri būtų sunaudojama naujo plastiko gamybai, kaip ir pats gaminamo naujo plastiko kiekis. Perdirbtas plastikas gali būti lengvai panaudojamas kuriant naujus produktus, naudojant žymiai mažesnę energijos kiekį (Jayaraman ir kt., 2004).

Antrinių žaliavų panaudojimo galimybės auga ir vis daugėja naujų gamybos technologijų, dėl kurių galima gaminti tokius produktus kaip: kilimus, vazas, krepšelius, parko suoliukus, lauko baldus (DeWeese, 1998). Dar iš perdirbo plastiko gali būti gaminamos: plastiko-medžio kompozitinės medžiagos (1.1.3 pav. a), kurios vis plačiau naudojamos rinkoje, atliekami bandymai, kurių metu betono mišiniuose užpildas keičiamas plastiko atliekomis (1.1.3 pav. b), taip pat betono mišiniuose

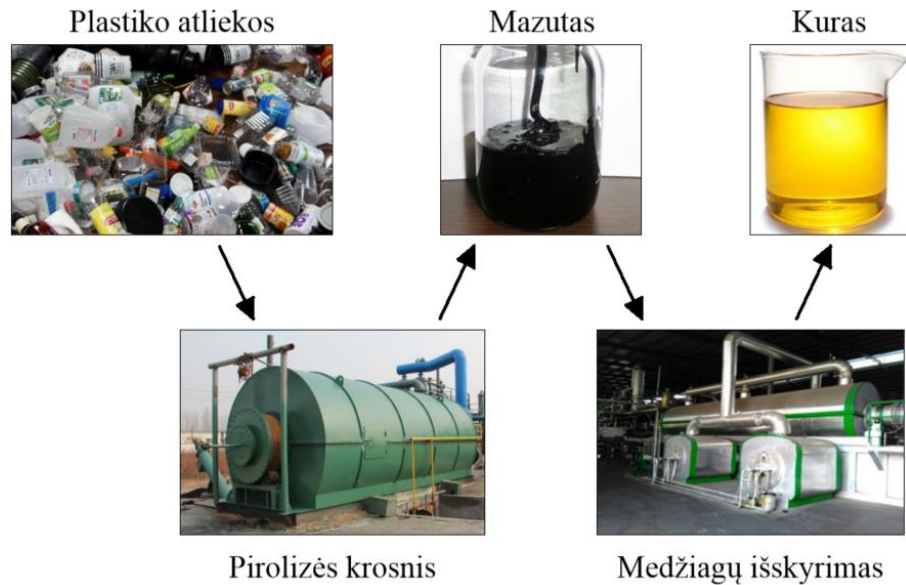
galima naudoti perdirbto polipropileno (PP) fibras (1.1.3 pav. c), kurios keičiančia armatūrą, tokiose kaip grindų konstrukcijose. Taip pat perdirbtas plastikas gali būti naudojamas asfaltbetonio gamyboje (1.1.3 pav. d), formuojant stogo elementus (1.1.3 pav. e), statybinius blokelius (1.1.3 pav. f).



1.1.3 pav. Plastiko atliekų panaudojimas: a) Medžio-plastiko kompozitai; b) Plastiką, kaip užpildą betone; c) Poliprolinines fibras; d) Asfaltbetonis; e) Stogo elementai; f) Blokėliai (sudaryta autoriaus)

Kaip buvo minėta anksčiau, šiandieninių technologijų dėka, energiją galima išgauti ir iš plastikų. Plastikai turi didelį energijos kiekį, kurį galima paversti į elektros energiją, sintetines dujas, kurą ir žaliavą naujo plastiko ar kitų cheminių produktų gamybai (www.americanchemistry.com; Ragaert ir kt., 2017).

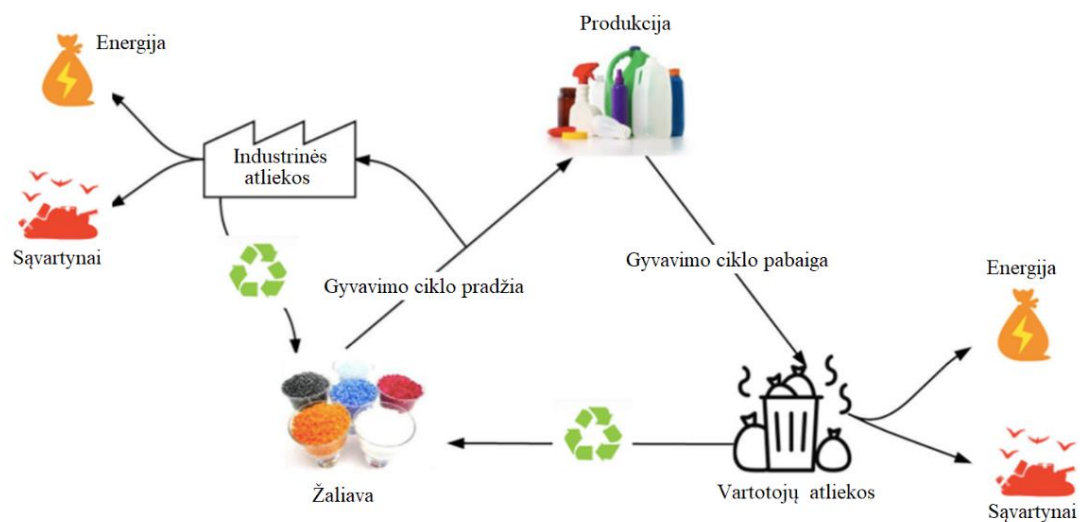
1.1.4 paveikslėlyje galima matyti plastiko perdirbimo į kurą schemą, naudojant pirolizės technologiją. Pirolizės proceso metu didelės organinės molekulės arba didelės hidrokarbonatų grandys yra suskaidomos aukštoje (300-600°C) temperatūroje (Sharma ir kt., 2014).



1.1.4 pav. Plastiko atliekų perdirbimo į kurą schema (sudaryta autoriaus, remiantis Sharuddin ir kt. duomenimis, 2017)

1.1.5 paveikslėlyje galima matyti polimerinių medžiagų gyvavimo ciklo schemą. Produkto, gaminamo vartotojui, gyvavimo ciklo pradinis etapas prasideda transformuojant žaliavą į įvairius produktus. Gamybos proceso metu atsiranda pirmoji plastiko atliekų rūšis, tai gali būti atliekos dėl užsakymų pasikeitimų, gaminiai su defektais, nukirptos ar likusios dalys gaminant produktą. Polimerinių medžiagų gyvavimo ciklas baigiasi tada, kai buvęs produktas yra utilizuojamas ir tampa vartotojo atlieka (Ragaert ir kt., 2017).

Norint pratęsti plastiko atliekų gyvavimo ciklą, atliekas reikia rūšiuoti ir perdirbti. Tik taip galima apsaugoti gamtą nuo taršos ir tausoti išteklius.

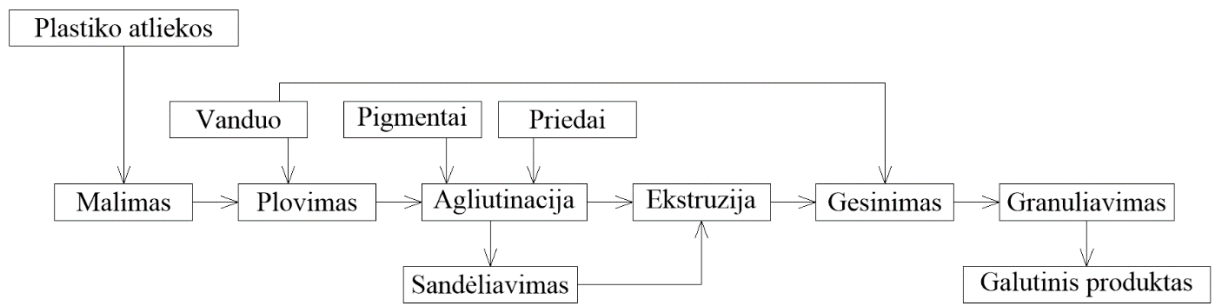


1.1.5 pav. Polimerinių medžiagų gyvavimo ciklas (PlasticsEurope ir kt., 2015)

1.1.3. Perdirbimo sunkumai

Pagal anksčiau pateiktus duomenis galima matyti, kad perdirbamo plastiko kiekis auga, bet didžiuliai atliekų kiekiai vis dar lieka neperdirbti. Tam yra galimos kelios priežastys. Viena iš pagrindinių priežasčių yra tai, kad nemaža perdirbto plastiko dalis negali būti panaudojama antrą kartą, dėl sveikatos ir aplinkosaugos reikalavimų (European Commission, 1998). Kita priežastis – tarpusavyje susimaišiusias skirtingo plastiko rūšis sunku atrūšiuoti ir tai reikalauja nemažai išteklių. 1.1.6 paveikslėlyje pateikiama supaprastinta plastiko perdirbimo mechaniniu būdu schema, kurioje atliekami šie etapai (Al-Salem ir kt., 2009):

- Pjaustymas / smulkinimas: dideli plastiko gabalai supjaustomi smulkintuvu ar pjaustikliais į mažesnius gabalėlius.
- Teršalų atskyrimas: popierius, dulkės ir kiti nešvarumai yra atskiriami nuo plastiko, dažniausiai cikloniniuose separatoriuose.
- Plūduriavimas: skirtingos plastiko gabalėlių rūšys yra atskiriamos plūduriavimo rezervuare, pagal jų tankius.
- Malimas: atskirti skirtingų polimerų plastikai yra sumalami.
- Plovimas ir džiovinimas: šiame etape plastiko atliekos gali būti nuplaunamos ir siunčiamos tolesniam apdorojimui arba nuplaunamos ir ruošiamos sandėliavimui. Abiem atvejais atliekos plaunamos vandeniu. Cheminis plovimas naudojamas tik tam tikrais atvejais (daugiausia klajams pašalinti nuo plastiko), kur yra naudojama kaustinė soda ir paviršinio aktyvumo medžiagos.
- Agliutinacija: produktas surenkamas ir paruošiamas sandėliavimui, arba pardavimui į jį pridėjus reikiamų pigmentų ir priedų, arba siunčiamas tolimesniam procesui.
- Ekstruzija: plastikas karšto spaudimo presu išspaudžiamas į vijas, vijos sukapojamos į granules, kurios vėliau naudojamos naujo vienos rūšies plastiko gamybai.
- Gesinimas: plastikas ataušinamas vandeniu, kad galėtų būti susmulkintas ir parduotas kaip galutinis produktas.



1.1.6 pav. Mechaninio perdirbimo schema (Aznar ir kt., 2006)

Dar viena problema, dėl kurios mažai atliekų yra perdirbama, jog žmonės atliekas rūšiuoja retai arba iš viso jų nerūšiuoja. Pagal 2015-2017 m. Lietuvoje atliktą apklausą galima matyti, kad 32-43 % respondentų rūšiuoja visas ar tik dalį atliekų, o 18-27 % atliekų nerūšiuoja išvis (www.rait.lt).





Dėl atliekų nerūšavimo didėja netinkamų panaudoti atliekų kiekis, o norint nesurūšiuotas atliekas perdirbti smarkiai išauga energijos suvartojimas, dėl atsirandančių papildomų perdirbimo procesų. Todėl tampa neekonomiška atliekas perdirbti ir jos išmetamos į sąvartynus.

1.2. Plastiko rūšys, sandara ir savybės

1.2.1. Plastiko rūšys

Plastikai gali būti suskirstyti į septynias skirtingas kategorijas, kurios yra susijusios su skirtingais polimerų tipais, naudojamais atitinkamuose plastikuose. Plastiko industrija išvystė plastiko identifikacijos kodus (dervos indentifikavimo kodus), pagal kuriuos galima efektyviai atskirti skirtingus polimerų tipus rūšivimui. Simboliai, naudojami koduotėje, sudaryti iš strėlių, kurios sukasi ratu pagal laikrodžio rodyklę ir sudaro trikampio suapvalintais kampais formą, kuri įrėmina skaitmenį, dažniausiai su sutrumpinimu, nusakančiu plastiko tipą (Cheng ir kt., 2014). 1.2.1 lentelėje galima matyti, kaip atrodo kiekvieno plastiko koduotė bei simbolis, iš kokios medžiagos gaminamas atitinkamas plastikas ir kokio tipo daiktai dažniausiai gaminami iš atitinkamo plastiko rūšies.

1.2.1 lentelė. Plastiko kodavimo sistema ir panaudojimas (So ir kt., 2014)


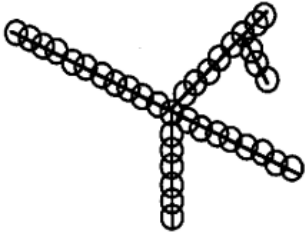
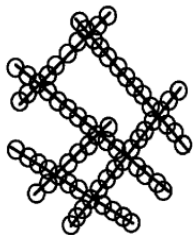
Kodas	Medžiaga	Daiktų pavyzdžiai
PET 	Polietileno tereftalatas	Skaidrūs minkšti gėrimų buteliai, plėvelės
HDPE 	Didelio tankio polietilenas	Ploviklio buteliai, industriniai įpakavimai ir plėvelės, prekių maišeliai
PVC 	Polivinil chloridas	Vandens vamzdžiai, vonios užuolaidos, kreditinės kortelės, pakavimo plėvelė, vandens konteineriai
LDPE 	Mažo tankio polietilenas	Duonos įpakavimai, plastikiniai maišeliai, marškinėlių krepšiai, vakuuminiai įpakavimai
PP 	Polipropilenas	Mikrobangų krosnelėse galimi šildyti konteineriai, saldumynų ir užkandžių įpakavimai, šiaudeliai
PS 	Polistirenas	Vienkartiniai puodeliai ir lėkštės, greito maisto dėžutės, CD dėklai, vaizdajuostės
KITI 	Visi kiti plastikai	CD, kompozitinės medžiagos

1.2.2. Plastiko sandara ir savybės

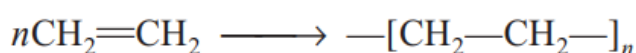
Visi plastikai yra polimerinės medžiagos. Polimeras – tai stambiamolekulinis junginys, susidedantis iš daug kartų pasikartojančių vienodų arba skirtingų atomų grupių mažos molekulinės masės junginių – monomerų, tarp kurių veikia kovalentinio ryšio jėgos (Kizinievič ir Žurauskienė, 2012).

Polimerai yra išgaunami polimerizacijos proceso metu, kai monomerų dalelės cheminių reakcijų metu susijungia į ilgas grandis. Šios ilgos grandys atskiria polimerus nuo kitų cheminių reakcijų rūšių ir suteikia jiems unikalias charakteristikas. Polimerų grandys gali būti: linijinės, išsišakojančios ir kryžminių ryšių (www.umich.edu). Polimerų grandžių schemas galima matyti 1.2.2 lentelėje.

1.2.2 lentelė. Polimerų grandžių tipai (www.umich.edu)

		
Linijinis	Išsišakojančios	Kryžminių ryšių

Pavyzdžiui, polietilenas, iš kurio gaminama elektros laidų izoliacija, susidaro iš pasikartojančių etileno dalelių (www.umich.edu):



čia n gali būti 25,000 ar daugiau.

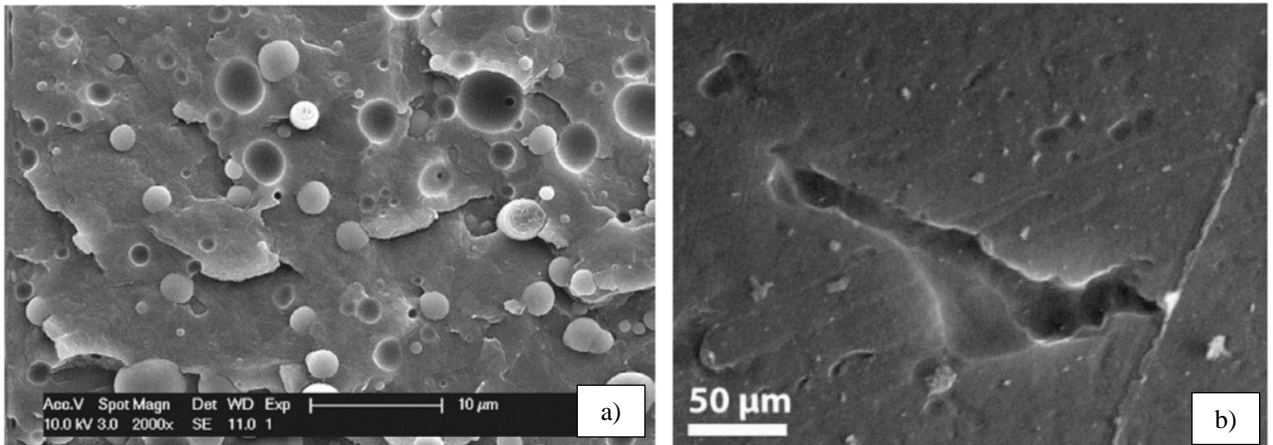
Kai kurių termoplastikų fizikinės-mechaninės savybės pateikiamos 1.2.3 lentelėje.

1.2.3 lentelė. Kai kurių termoplastikų fizikinės-mechaninės savybės (Kizinievič ir Žurauskienė, 2012)

Savybės ir matavimo vienetai	Termoplastikų pavadinimas				
	PE		PP	PVC	PS
	Mažo tankio	Didelio tankio			
$\rho, \text{kg/m}^3$	915-925	940-960	900-930	1350	1050-1080
$DT, ^\circ\text{C}, (\text{min}/\text{max})$	-50/70	-60/100	-5/150	-15/50	-40/65
$LT, ^\circ\text{C}$	115	135	176	-	-
HB	14-25	45-63	80-90	30-120	140-150
E, MPa	19	860	1400	3400	4100
σ, MPa	10	31	35	48	37
$\varepsilon, \%$	800	1200	700	60	0,9

Kaip galima matyti pagal 1.2.3 lentelės duomenis, kiekviena plastiko rūšis turi savo unikalias fizikines ir mechanines savybes, taip pat, kaip ir chemines. Dėl to plastiko atliekos rūšiuojant turi būti išskirtos į 1.2 skyriuje minėtas kategorijas, norint, kad produktas formuojamas iš perdirbto plastiko būtų kokybiškas.

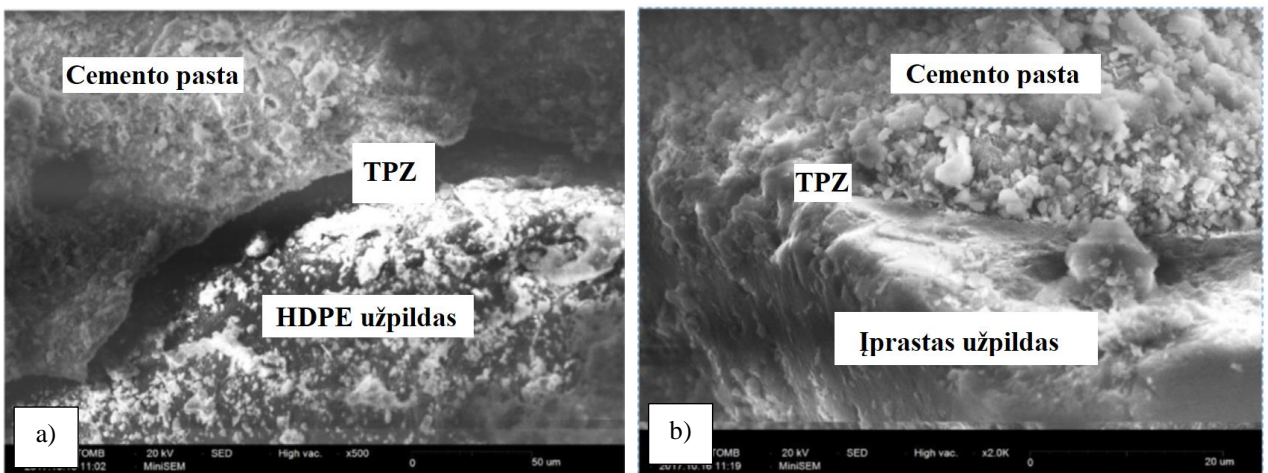
Analizuojant plastikų savybes pastebima, kad produktas pagamintas iš skirtingų rūšių plastiko mišinio parodo blogesnes stiprio savybes. Taip gali būti dėl menkesnio tarpusavio skirtingų plastikų dalelių paviršiaus sankabumo. 1.2.1 paveikslėlyje galima matyti skenuojančio elektroninio mikroskopo (SEM) nuotraukas, kuriose pavaizduotas PP (85 %) ir PET (15 %) plastikų mišinio bandinio paviršiaus vaizdas (a) ir gryno HDPE plastiko bandinio paviršiaus vaizdas (b).



1.2.1 pav. SEM nuotraukos. PP/PET mišinio bandinio paviršius (a) ir gryno HDPE bandinio paviršius (b) (Ragaert ir kt., 2017; Grigoriadou ir kt., 2017)

Kaip galima matyti 1.2.1 pav. (a), skiriasi PP ir PET plastikų morfologija. PP plastikas susidaro iš didelių tęstinių pluoštų, o PET plastikas susideda iš daugybės lašelių. Dėl šių sandaros skirtumų komponentai nėra tarpusavyje suderinami ir plastikų dalėlės tarpusavyje veikia priešišškai ir prastai sąveikauja. 1.2.1 pav. (b) matomo gryno HDPE plastiko bandinio paviršius pakankamai lygus ir turintis mažiau defektų, lyginant su plastikų mišinio bandiniu.

Blogas plastiko dalelių paviršiaus sankabumas pastebimas ne tik tarp skirtingų plastikų rūšių, tačiau ir tarp skirtingų medžiagų. 1.2.2 paveikslėlyje galima matyti mūro mišinio, kuriame kaip užpildas buvo naudojamos HDPE plastiko atliekų granulės (a) ir mūro mišinio, kai naudojamas įprastas smėlio užpildas (b) bandinių SEM nuotraukas.



1.2.2 pav. Mūro mišinio su HDPE plastiko užpildu (a) ir mūro mišinio su smėlio užpildu (b) SEM nuotraukos

Kaip galima matyti, bandiniuose su HDPE plastiko granuliu užpildu (1.2.2 pav. a), ties tarpine pereinamąja zona (TPZ), cemento pastos ir plastiko granuliu paviršiu sukibimo kokybė prasta, lyginant su bandiniu, kuriame naudojamas įprastas smėlio užpildas (1.2.2 pav. b). Prastas tarpusavio dalelių sąryšis pasireiškia sumažėjusiu stipriu gniuždant.

1.3. Perdirbto plastiko mechaninių savybių tyrimai ir perdirbimo technologija

1.3.1. Bandinių iš HDPE/LDPE/PP plastikų mišinio formavimo technologija ir mechaninės savybės

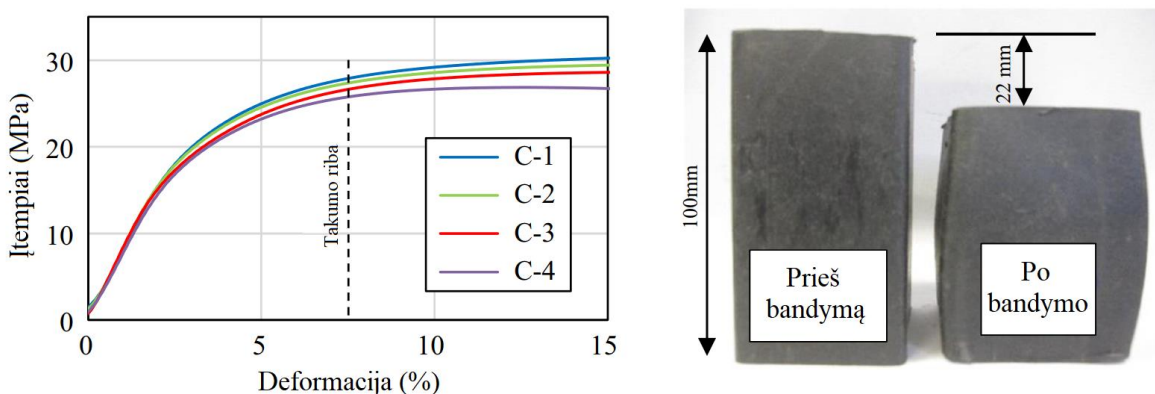
Buvo atliktas tyrimas, kurio metu buvo tiriamos bandinių, sukurtų iš HDPE/LDPE/PP plastikų mišinio mechaninės savybės. Plastikų santykiai mišinyje buvo nežinomi. Formuojant bandinius buvo naudojama tokia technologija:

- plastiko gabalėliai buvo suberti į ekstruderį, kuriame jie sulydomi į vientisą masę 170°C temperatūroje ir iš jų išspaudžiamos vijos;
- vijos sukarpomos į 4-5 mm ilgio granules;
- granulės atvėsinaamos vandeniui;
- kaitinimo krosnyje, 60°C temperatūroje, granulės išdžiovinamos;
- plastiko granulės suberiamos į bandinio formą ir suspaudžiamos hidrauliniu presu.

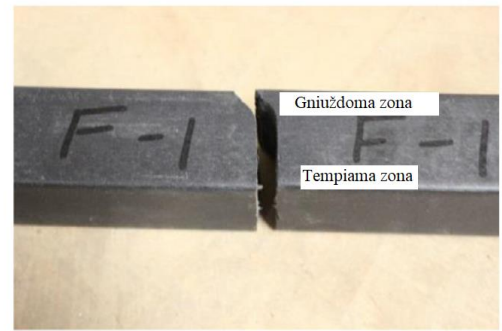
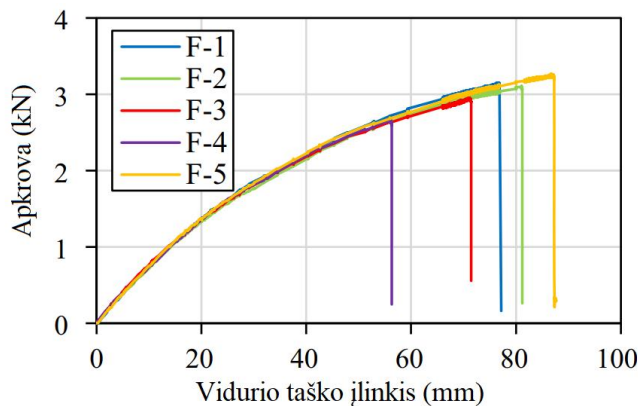
Naudojant šią technologiją, buvo suformuoti devyni bandiniai, kurios skerspjūvio matmenys 55 x 55 mm, ilgis – 100 mm.

Pirmiausia, buvo atliktas stiprio gniuždant bandymas. 1.3.1 paveikslėlyje galima matyti tyrimų metu gautas įtempių-deformacijų kreives bei bandinių suirimo pobūdį.

Kaip galima matyti, atliekant stiprio gniuždant bandymą, bandiniai pasiekė takumo ribą, esant maždaug 8 % deformacija. Maksimalus bandinių stipris gniuždant buvo apie 13 MPa. Taip pat buvo pastebėta, kad visi bandiniai išsipūtė ir pašalinus apkrovą patyrė negrįžtamą deformaciją (1.3.1 pav.) (Bajracharya ir kt., 2015).



Dar buvo atliktas keturių taškų lenkimo bandymas. 1.3.2 paveikslėlyje pateikiami bandymo rezultatai ir bandinių suirimo pobūdžio vaizdas.



1.3.2 pav. Lenkimo bandymo rezultatai ir bandinių suirimo pobūdis (Bajracharya ir kt., 2015)

Pagal pateikiamas apkrovos-įlinkio kreivas galima matyti, kad kreivės kinta beveik tiesiškai iki kol bandinys įlinksta 15-20 mm. Tada kreivės pradeda kisti ir įtempiai tampa neproporcingi deformacijoms. Įtempiai toliau auga iki tol, kol bandinys suyra. Bandiniai suiro esant 2,7-3,3 kN apkrovai. Bandymo metu buvo pastebėta, kad bandiniai suyra, kaip trapi medžiaga ir perlūžo per pus (Bajracharaya ir kt., 2015).

Toks bandinių suirimo pobūdis galėjo pasireikšti dėl skirtingų rūšių plastiko sandaros nesuderinamumo. Skirtingų plastiko dalelių paviršiai tarpusavyje prastai sukibo, dėl ko galėjo pasireikšti trapi deformacija.

1.3.2. Medžio-plastiko kompozitų savybės, naudojant perdirbtą arba gryną plastiką

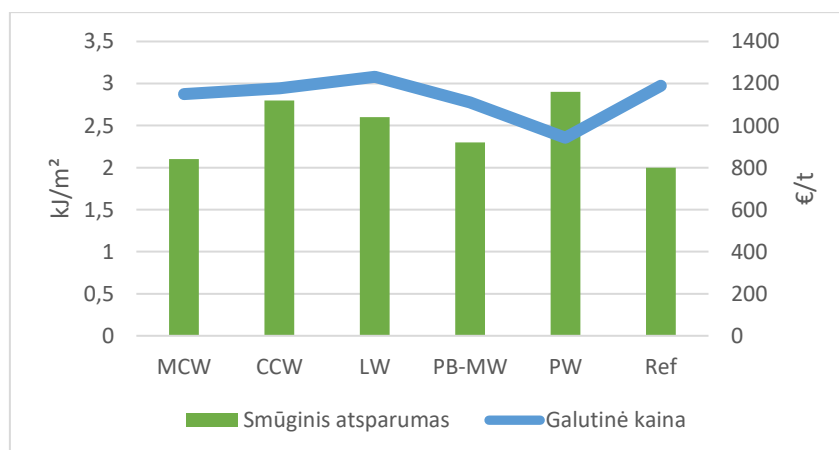
Buvo atliktas tyrimas, kurio metu buvo tiriamos medžio-plastiko kompozitų (WPC) mechaninės savybės. Bandiniai buvo gaminami naudojant perdirbtą arba gryną didelio tankio polietileno (HDPE) plastiką, maišant jį su medžio pudra, kuri atstojo užpildą. Bandiniai buvo formuojami karštu presu

Pagal 1.3.1 lentelės duomenis galima matyti, jog gryno plastiko stipris lenkiant (22,4 MPa) buvo mažesnis, nei perdirbto plastiko žaliavos (23,1 MPa). Taip galėjo įvykti dėl standesnės polimerų matricos perdirbtame plastike. Taip pat ir kompozitai pagaminti su perdirbto plastiko atliekomis parodė didesnę stiprį lenkiant, nei pagaminti su grynu plastiką, esant tam pačiam plastiko-medžio pudros santykiui. Pavyzdžiui, esant plastiko-medžio pudros santykiui 60:40, kompozitų lenkiamasis stipris buvo 20,0 MPa, o kompozitų su grynu plastiką 17,9 MPa. Greičiausiai taip galėjo įvykti dėl įsimaišiusių kitų rūšių polimerų ir cheminių nešvarumų perdirbtame HDPE, dėl ko galėjo pagerėti sąlyčio paviršių sukibimas (Adhikary ir kt., 2007).

1.3.1 lentelė. HDPE-medžio pudros kompozitų tempimo ir lenkimo savybės (Adhikary ir kt., 2007)

Bandinio žymuo	Tempimo savybės				Lenkimo savybės			
	Stipris, MPa	Tamprumo modulis, MPa	Takumo riba, MPa	Maks. Deformacija, %	Stipris, MPa	Tamprumo modulis, MPa	Takumo riba, MPa	Maks. Deformacija, %
vHDPE	21,4	-	-	-	22,4	0,84	10,2	8,1
rHDPE	23,2	-	-	-	23,1	0,84	9,2	7,6
vHDPE60W40	11,8	1,64	5,1	1,9	17,9	1,06	8,5	3,9
rHDPE60W40	13,7	1,7	6,3	1,7	20,0	1,13	9,4	3,4
vHDPE50W50	9,5	1,68	5,2	1,1	14,4	1,34	6,2	2,6
rHDPE50W50	12,3	1,7	7,1	1,5	15,6	1,42	6,8	2,2

Keskisaari 2018-aisiais atliko tyrimą, kaip perdirbto ir gryno plastiko bei kitų papildomų perdirbtų atliekų naudojimas medžio-plastiko kompozituose įtakoja produkto pelningumą ir mechanines savybes. Kaip galima matyti 1.3.3 paveikslėlyje, galutinė WPC produkto kaina, naudojant perdirbto plastiko atliekas (PW), buvo daugiau kaip 20% žemesnė, lyginant su produktu, kuris buvo pagamintas naudojant šviežias žaliavas (Ref). Taip pat, naudojant perdirbto plastiko atliekas buvo gautas geriausias bandinių smūginis atsparumas, kuris buvo didesnis net 30 %, lyginant su gryno plastiko bandiniais.



1.3.3 pav. Kompozitų smūginis atsparumas ir galutinė kaina (Keskisaari ir kt., 2018)

Pagal Adhikary ir Keskisaari duomenis galima teigti, kad plastiko atliekų naudojimas medžio-plastiko kompozituose pakankamai efektyvi alternatyva grynai plastiko žaliavai. Sumažinamos produkto kainos, dėl standesnės perdirbtų polimerų matricos gaunamas didesnis bandinių stiprumas ir atsparumas, sumažinama produkto gamybos kaina.

1.3.3. Mažo tankio polietileno (LDPE) vandens maišelių ir smėlio mišinio bandinių tyrimai ir technologija

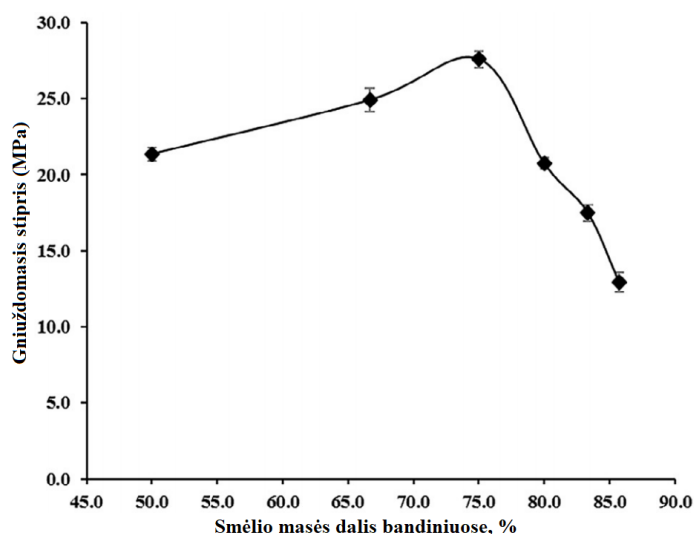
Kumi-Larbi atliko tyrimą, kurio metu buvo tiriama smėlio ir plastiko santykio įtaka, LDPE-smėlio mišinio bandinių gniuždomajam stipriui. Buvo suformuoti bandiniai, pagal 1.3.4 paveikslėlyje pateikiamą technologiją. Bandiniuose buvo naudojamas smėlis, kurio dalelių dydis (d) $d < 500 \mu\text{m}$.



1.3.4 pav. LDPE-smėlio mišinio bandinių paruošimo technologija (Kumi-Larbi ir kt., 2018)

Stiprio gniuždant bandymams buvo suformuoti kelių rūšių bandiniai, su skirtingomis LDPE ir smėlio proporcijomis. Atlikus stiprio gniuždant bandymus buvo pastebėta, jog bandinių stiprumas augo didėjant smėlio kiekiui mišinyje, tačiau nustojo didėti, kai buvo pasiekta 75 % masės dalis. Šie bandiniai pasiekė maksimalų 27,3 MPa stiprumą, o tai žymiai didesnis stipris, lyginant su plačiai naudojamais smėlbetonais ir gali būti prilyginamas C20/25 klasės betonui. Suformuotų LDPE-smėlio mišinio bandinių tankis siekė 1760 kg/m^3 , lyginant su įprastų betonų tankiu, kuris kinta nuo 2240 kg/m^3 iki 2400 kg/m^3 , buvo gauta žymiai lengvesnė medžiaga (Kumi-Larbi ir kt., 2018).

1.3.5 paveikslėlyje pateikiamas plastiko ir smėlio santykio įtakos bandinių gniuždomajam stipriui grafikas.



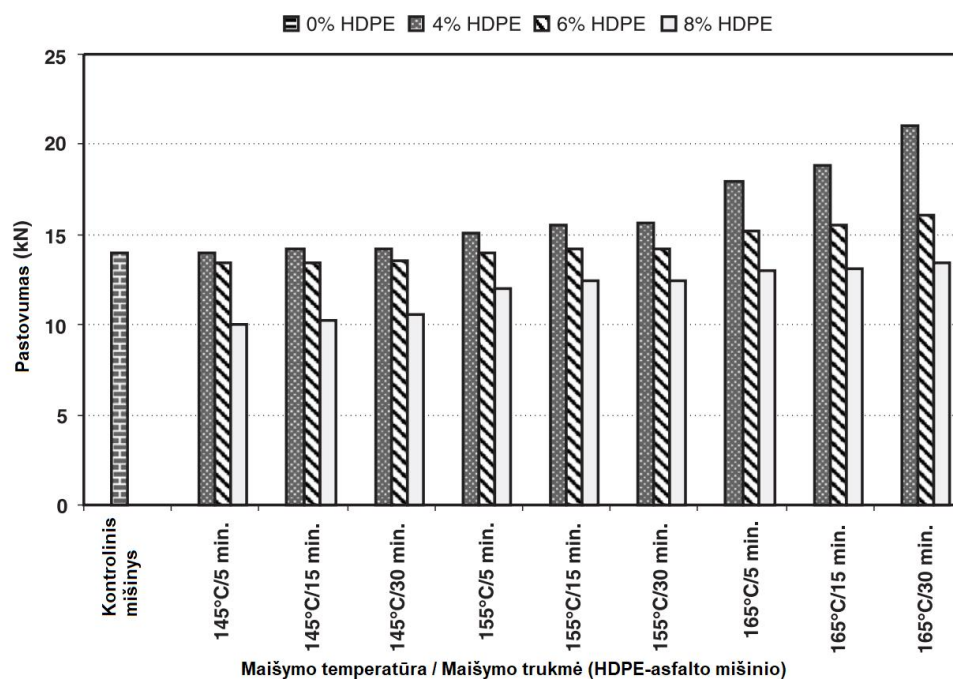
1.3.5 pav. Smėlio ir plastiko santykio įtaka bandinių gniuždomajam stipriui (Kumi-Larbi ir kt., 2018)

Pagal gautus rezultatus galima matyti, kad plastiko ir smėlio mišinys parodė pakankamai aukštus rezultatus stiprio gniuždant bandyme ir lyginant su alternatyviais betonais, buvo žymiai lengvesnis. Dėl šių parametų ši medžiaga turi potencialo būti naudojama statybos produktų gamyboje, pavyzdžiui, formuojant aplinkotvarkos elementus.

1.3.4. Plastiko atliekos asfaltbetonyje

2003-aisiais Agar atlikto tyrimo metu buvo nustatyta efektyviausia HDPE plastiko atliekų ir bitumo mišinio paruošimo technologija ir savybės.

1.3.6 paveikslėlio duomenys rodo, jog 4 % HDPE plastiko atliekų ir bitumo mišinio bandiniai, paruošti esant 165°C maišymo temperatūrai ir 30 min. maišymo trukmei, pasiekė didžiausią pastovumą. Pastovumas kelių projektavime rodo mišinio atsparumą įspaudimui ir vėžių atsiradimui, esant transporto priemonių judėjimui. Lyginant kontrolinį bitumo mišinį, kuris yra be plastiko priedo, su prieš tai minėtu, pastovumas išaugo daugiau kaip 30 %. Tai parodo, jog šis mišinys yra žymiai atsparesnis ilgalaikėms deformacijoms (Agar ir kt., 2003).



1.3.6 pav. Stabilumo priklausomybė nuo Maišymo temperatūros / Maišymo trukmės (Agar ir kiti, 2003)

Pagal Nkanga atlikto tyrimo rezultatus pateikiamus 1.3.2 lentelėje galima matyti, jog lyginant bitumo mišinį be plastiko atliekų ir su jomis, pastebimas mišinio pastovumo prieaugis, kuris vidutiniškai siekia apie 21 %.

1.3.2 lentelė. Bitumo-plastiko mišinio parametrai (Nkanga ir kt., 2017)

Mišinys	Tankis (g/cm ³)	Stabilumas (kN)	Sklidumas (mm)
Be plastiko	2,405	11,35	4,5
5 % PE	2,354	14,03	4,1
10 % PE	2,325	14,8	3,3
15 % PE/PS	2,375	14,6	3,5

Pagal 1.3.6 pav. ir 1.3.2 lentelės duomenis galima teigti, kad plastiko atliekos asfaltbetonio mišiniuose daro teigiamą įtaką. Įdėjus plastiko atliekos priedo gaunamas didesnis mišinio pastovumas ir šiek tiek sumažinamas mišinio tankis. Dėl to keliai tampa ilgaamžiškesnis ir juos reikia mažiau remontuoti.

Tradicinio asfaltbetonio mišinio keliai išlaiko savo savybes ir kokybę keturis – penkis metus, o esant plastiko-bitumo mišinio keliams, teigiama, jog keliai gali išlaikyti savo kokybę iki dešimties metų (Verma, 2008).

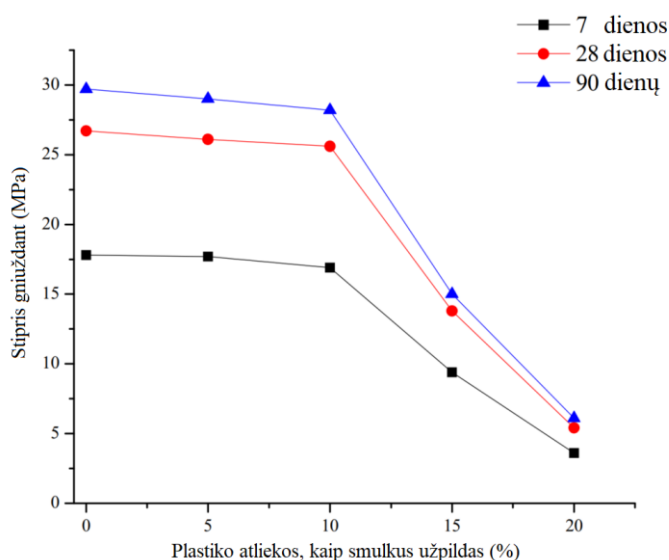
Taip pat, mišiniuose naudojant plastiko atliekas saugoma gamta ir mažiau atliekų yra išmetamos į sąvartynus.

1.3.5. Plastiko, kaip užpildo, naudojimas betone

1.3.7 paveikslėlyje pateikiami stiprio gniuždant bandymo rezultatai, kai PET plastiko atliekos betono bandiniuose buvo naudojamos, kaip smulkaus užpildo dalis.

Pirmiausia, buvo suformuoti kontroliniai betono be plastiko atliekų bandiniai, kurių stipris gniuždant po 7, 28 ir 90 parų buvo 17,8 MPa, 26,7 MPa ir 29,5 MPa, atitinkamai. Betono bandiniuose, pakeičiant smulkaus užpildo dalį PET plastiko atliekomis, bandinių stipris didinant plastiko kiekį – mažėjo. Kai plastiko kiekis bandiniuose buvo 5 %, bandinių stipris gniuždant sumažėjo maždaug iki 17,0 MPa po 7 parų, iki 26,0 MPa po 28 parų ir iki 29,0 MPa po 90 parų. Esant 10 % plastiko kiekiui, bandinių stipris gniuždant po 7, 28 ir 90 parų buvo maždaug 16,5 MPa, 25,8 MPa ir 28,0 MPa

Bandinių stipris gniuždant galėjo sumažėti dėl plastiko dalelių glotnaus paviršiaus, kuris prastai sukimba su betono skiedinio rišamosiomis medžiagomis, plačiau apie šį reiškinį rašoma 1.2.2 skyriuje.

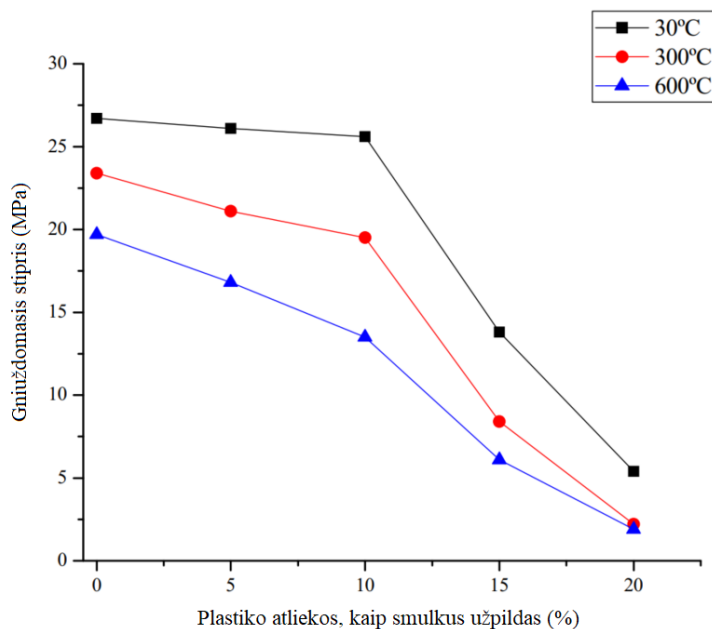


1.3.7 pav. Betono su plastiko atliekomis, pakeičiant smulkų užpildą, stipris gniuždant (Saxena ir kt., 2018)

Taip pat buvo atliktas bandymas, kurio metu buvo tiriamas betono ir plastiko mišinio bandinių gniuždomasis stipris, po to, kai bandiniai buvo paveikti aukštos temperatūros. 1.3.8 paveikslėlyje pateikiamos stiprio gniuždant bandymo įtempių-smėlio kiekio kreivės.

Visuose bandiniuose buvo pastebėtas gniuždomojo stiprio sumažėjimas, po to, kai bandiniai buvo paveikti didelės temperatūros. Dėl temperatūrinio gradiento betone jis pradeda skilinėti, taip pat dėl skirtingų fizikinių ir cheminių pasikeitimų betone. Bandiniai buvo kaitinami 300°C ir 600°C temperatūrose, jų stipris buvo lyginamas su kontroliniu bandiniu, kuris buvo kaitinamas 30°C temperatūroje. Kaitinimo proceso metu PET plastikas išskyrė įvairias kenksmingas medžiagas, kaip:

CO, CO₂, rūgštis, esterį ir kt. Dėl plastiko irimo ir minėtų produktų atsiradimo susidaro didesnės tuštumos ir atsiranda temperatūriniai įtempiai betone. Taip pat, PET plastiko struktūra yra labiau porėta nei betono, dėl to netolygiai pasiskirsto temperatūrinis gradientas ir formuojasi įtrūkimai (Saxena ir kt., 2018).



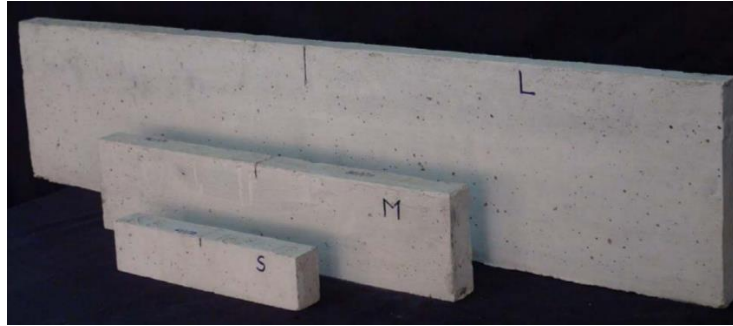
1.3.8 pav. Betono, su plastiko atliekomis, kaip smulkiau užpildu, gniuždomasis stipris, veikiant aukštai temperatūrai (Saxena ir kt., 2018)

Kaip galima matyti pagal 1.3.8 paveikslėlio duomenis, bandinių stipris gniuždant juos pakaitinus aukštoje temperatūroje smarkiai krito. Pavyzdžiui, esant 10 % plastiko daliai bandiniuose, stipris gniuždant bandinius pakaitinus 300°C i 600°C temperatūrose buvo maždaug 19,5 MPa ir 14,0 MPa, atitinkamai. Lyginant su kontroliniu bandiniu, kuris buvo kaitinamas 30°C, stipris krito apie 30-50 %.

Pagal gautus tyrimo rezultatus galima daryti išvadą, jog PET plastikas, kaip užpildas betone gali būti panaudojamas grindiniuose, ar grindų plokštėse. Tai pat pramoninės paskirties pastatuose, kuriuose dažnai gali kristi kroviniai ar įvairūs produktai. Ši medžiaga galėtų pagerinti grindinio ilgaamžiškumą (Saxena ir kt., 2018).

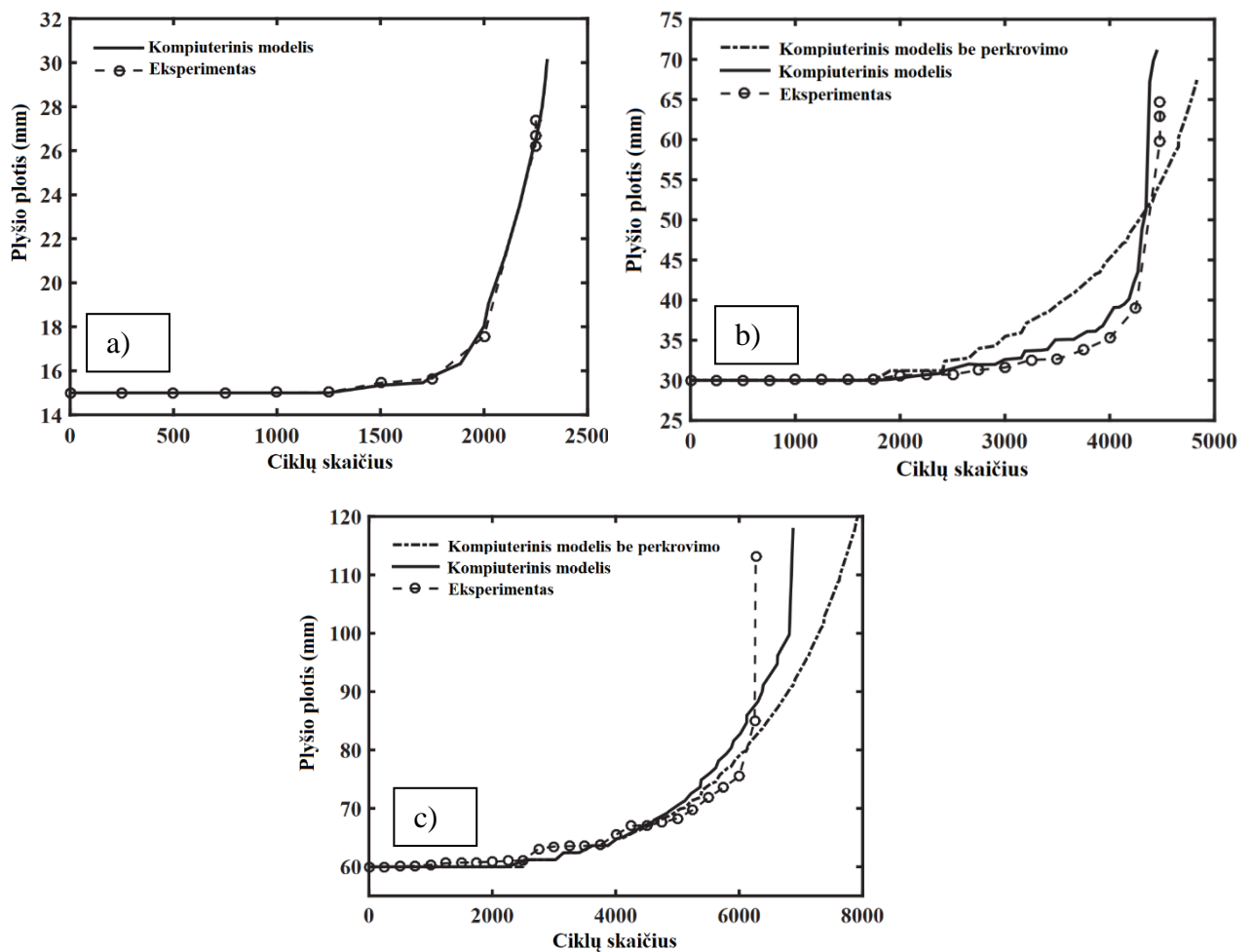
1.3.6. Plastiko ir betono nuovargio tyrimai

Buvo atliktas nuovargio bandymas su trijų skirtingų dydžių betoninėms sijoms (1.3.9 pav.). Bandymui atlikti buvo naudojamos trijų skirtingų dydžių sijos: maža (S), vidutinė (M) ir didelė (L). Sijose naudojamo betono stipris gniuždant buvo 56 MPa.



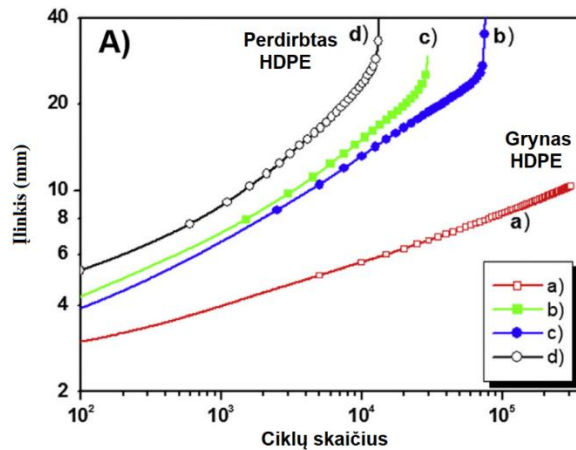
1.3.9 pav. Betoninių sijų su įpjovomis bandiniai: maža sija, vidutinė sija, didelė sija (Keerthana ir kt., 2018)

1.3.10 paveikslėlyje pateikiamos kreivės rodo, kiek apkrovimo ciklų atlaikė kiekvienas bandinys. Maža sija lūžo pasiekus 2366 ciklus, vidutinė sija lūžo pasiekus 4317 ciklų ir didelė sija lūžo esant 6581 ciklui (Keerthana ir kt., 2018).



1.3.10 pav. Plyšio pločio-ciklų skaičiaus kreivės mažai(a), vidutinei (b) ir didelei (c) betoninei sijai (Keerthana ir kt., 2018)

Šiuos duomenis galima palyginti, su HDPE tipo plastiko nuovargio bandymo rezultatais (1.3.11 pav.).



1.3.11 pav. Įlinkio-ciklų skaičiaus kreivės. Medžiagos: a) PE100, b) HDPE-M, c) HDPE-R, d) HDPE-P (Alzerreca ir kiti, 2015)

Kreivės pateikiamos 1.3.11 paveikslėlyje rodo keturių skirtingos sudėties HDPE plastiko bandinių nuovargio bandymo rezultatus.

Pirmoji plastiko grupė buvo pagaminta iš aukštos kokybės gryno plastiko žaliavos, dažniausiai naudojamos vamzdžių gamybai (PE100). Antroji grupė (HDPE-R), buvo plastikai, kurie yra įvairių produktų gamybos proceso atliekos. Trečioji grupė (HDPE-M), aukštos kokybės gryno plastiko žaliavos (80%) ir perdirbtos nežinomos kilmės HDPE plastiko žaliavos mišinys. Ketvirtoji grupė (HDPE-P), perdirbtas plastikas iš buityje naudojamų plastiko atliekų (baliklio, kitų valymo priemonių tarų) (Alzerreca ir kiti, 2015).

PE100 plastiko bandinys įtrūko po 315 000 ciklų, HDPE-R po 30 000, HDPE-M po 80 000, o HDPE-P po 13 000 ciklų (Alzerreca ir kiti, 2015).

Taigi, galima pastebėti, jog perdirbto plastiko bandiniai atlaikė dvigubai didesnę apkrovų ciklų skaičių, nei betono bandiniai. Tokį didelį skirtumą galėjo įtakoti besiskiriantys pradiniai tyrimo parametrai (apkrovos dažnis, amplitudė, temperatūra) ir plastikui būdingas plastiškas suirimas. Tačiau galima teigti, kad esant ciklinėms apkrovoms plastikas nenusileidžia betonui ir dėl savo atsparumo ciklinėms apkrovoms gali būti naudojamas statybos produktų gamyboje.

1.4. Literatūros analizės išvados ir išsikeliami uždaviniai

1. Atlikta nedaug tyrimų, kurie parodo, kaip reikia atlikti technologinį plastiko perdirbimo procesą ir kokią įtaką jis turi formuojamų bandinių kokybei.
2. Trūksta daugiau informacijos apie perdirbto plastiko fizikines ir mechanines savybes. Plastiko atliekų kiekis nuolat auga, todėl reikia ieškoti sprendimų, leidžiančių plačiau panaudoti plastiko atliekas, tai galima padaryti kuriant naujas plastiko ir kitų medžiagų sudėtis.

3. Nėra informacijos apie plastiko granulių elgseną ypač lengvo betono mišinio bandiniuose.

Pagal literatūros analizės išvadas, galima išsikelti šiuos uždavinius:

1. Panaudojant vietines plastiko atliekas sukurti efektyvų perdirbimo technologinį procesą.
2. Ištirti suformuotų bandinių pagrindines fizikines ir mechanines savybes.
3. Sukurti ypač lengvo betono mišinį su plastiko granulėmis ir ištirti suformuotų bandinių mechanines savybes.

2. TYRIMAMS NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI

2.1. Tyrimuose naudotos medžiagos

Plastikas

Bandymams buvo naudojamos perdirbtos didelio tankio polietileno (HDPE) plastiko atliekų granulės (2.1.1 pav.). Savybės: granulė dydis < 10 mm, tankis – 941 kg/m³, piltinis tankis – 350 kg/m³, lydymosi temperatūra – 135°C.



2.1.1 pav. Tyrimuose naudotos didelio tankio polietileno (HDPE) plastiko granulės

Devulkanizuota padangų guma

Tyrimams naudota UAB „Devulco“ įmonės devulkanizuota padangų guma (2.1.2 pav.). Tai produktas, padarytas perdirbant naudotas padangas ar jų dalis, naudojant mechaninius perdirbimo procesus įtraukiant devulkanizacijos agentą. Savybės: dalelių dydis 80 μm – 1,6 mm, tankis – 830 kg/m³.



2.1.2 pav. Devulkanizuota padangų guma

Devulkanizaciją apibendrintai galima įvardyti, kaip vulkanizacijos metu susidariusių poli-, di- ir mono-sulfido jungčių dalinį arba visišką suskaidymą. Tai reiškia, kad devulkanizavimas gali būti apibūdinamas, kaip selektyvus sulfido jungčių suskaidymas, nesuskaidant pačio polimero. Atlikus šį procesą, padangų gumą gali būti naudojama kaip antrinė žaliava, gaminant naujos gumos mišinius ar polimerus (Asaro ir kt., 2018).

Gamtinis smėlis

Tyrimuose buvo naudojamas gamtinis smėlis, paimtas iš UAB „Zatyšių karjeras“. Savybės: 0/1 frakcija, tankis – 2390 kg/m³, piltinis tankis – 1503 kg/m³. Užpildas atitinka LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus.

Aliuminio pudra

Tyrimams buvo naudota aliuminio pudra. Savybės: tankis – 2700 kg/m³, lydymosi temperatūra – 660°C, tamprumo modulis 70 MPa, dalelių dydis <30 μm.

Gipsas

Tyrimuose naudoto gipso savybės: tankis – 2318 kg/m³, vidutinis dalelių dydis – 34,42 μm. Cheminė sudėtis: CaO - 38,2 %, SO₃ – 50,1 %, netirpios medžiagos – 4,2 %, dalis prarandama kaitinant – 6,8 %.

Natrio hidroksidas

Tyrimams buvo naudotas granuliuotas natrio hidroksidas (NaOH). Savybės: molinė masė – 39,9971 g/mol, lydymosi temperatūra – 318°C, virimo temperatūra – 1390°C, tirpumas – 111g/100 ml (20°C).

Polipropileninės fibros

Tyrimuose buvo naudotos polipropileninės fibros. Savybės: plaušelių ilgis – 18 mm, diametras 34 μm, tankis – 910 kg/m³. Savybės atitinka LST EN 14889-2:2007 EN standartą.

Cementas

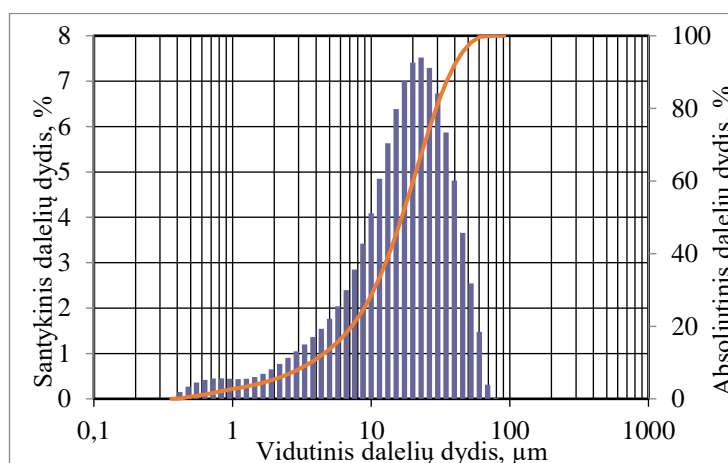
Tyrimuose buvo naudotas AB „Akmenės cementas“ portlandcementis CEM I 52.5 R. Savybės: normalaus tirštumo tešla – 28,5 %, rišimosi pradžia – 110 min., rišimosi pabaiga – 210 min., stipris gniuždant (po 2/28 parų) – 32,3/63,1 MPa, vidutinis dalelių dydis – 20,29 μm . Mineraloginė sudėtis: C_3S – 68,70 %; C_2S – 8,70 %; C_3A – 0,2 %; C_4AF – 15,90 % (Vaitkevičius ir kt., 2018). Cheminės sudėtis pateikiama 2.1.1 lentelėje.

2.1.1 lentelė. Cheminė cemento sudėtis (Vaitkevičius ir kt., 2018).

Medžiaga	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O	Na ₂ O _{ekv.}	D*
Kiekis, %	21,10	0,22	3,42	5,23	0,05	0,79	66,40	1,93	0,19	0,38	0,28	0,44	0,6

Pastaba: D* - dalis prarandama kaitinant.

Cemento savybės atitinka LST EN 197-1:2011 standarto reikalavimus. Cemento granulimetrinė kreivė pateikiama 2.1.3 paveikslėlyje.



2.1.3 pav. Cemento granulimetrinė kreivė

2.2. Tyrimų metodai

Tankio nustatymas

Sukurtų bandinių tankis buvo nustatomas remiantis LST EN 12390-7:2009 standartu, nurodančiu sukietėjusio betono tankio nustatymo metodus. Tankis nustatomas bandinio masės ir tūrio santykiu.

Bandinio masė buvo nustatoma naudojant svarstyklės, kurių paklaida 0,5 g. Nustatyti bandinių tūriui buvo atliekami matavimai, naudojant slankmatį.

Bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas

Atliekant stiprio gniuždant bandymus buvo remiamasi LST EN 12390-3:2009 standartu, nurodančiu betono bandinių stiprio gniuždant nustatymo metodus.

Bandymo metu, bandiniai yra veikiami apkrovos iki kol suyra. Fiksuojama maksimali pasiekta apkrova gniuždant ir apskaičiuojamas bandinio stipris gniuždant.

Bandymai buvo atliekami gniuždymo mašina (2.2.1 pav.), kuri atitinka LST EN 12390-4:2003 LT standartą, nurodantį bandymo mašinos techninius reikalavimus.



2.2.1 pav. „Toni Technik“ hidraulinis presas, stiprio gniuždant bandymams

Bandinių lenkiamojo stiprio nustatymas

Bandinių lenkiamasis stipris buvo nustatomas remiantis LST EN 12390-5:2009 standartu, kuris nurodo betono bandinių lenkiamojo stiprio nustatymo metodus.

Prizminiai bandiniai yra veikiami lenkimo momento, kuris sudaromas per viršutinį ir apatinius ritinėlius. Fiksuojama maksimali veikusi apkrova ir apskaičiuojamas bandinio lenkiamasis stipris.

Bandymai buvo atliekami bandymų mašina (2.2.2 pav.), atitinkančia LST EN 12390-4:2003 LT standartą, nurodantį bandymo mašinos mechaninius reikalavimus.

Bandinio stipris lenkiant apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d \cdot h^2} \quad (2.2.1)$$

Čia:

f_{cf} – lenkiamasis stipris, MPa (N/mm²);

F – maksimali veikusi apkrova, N;

l – atstumas tarp apatinių atraminių ritinėlių, mm;

d – bandinio plotis, mm;

h – bandinio aukštis, mm.



2.2.2 pav. „Toni Technik“ hidraulinis presas, stiprio lenkiant bandymams

HDPE plastiko bandinių ruošimas

Ruošiant HDPE plastiko bandinius, plastiko granulės buvo sudedamos į formą. Forma įdedama į kaitinimo krosnį, įkaitintą iki 300°C ir mišinys kaitinamas 60 min., iki kol plastiko granulės susilydė į vientisą masę.

Bandymams su HDPE ir DPG mišiniu buvo suformuota mažiausiai po tris kiekvienos rūšies bandinius. 1 m³ mišinio paruošti reikia 932 kg HDPE plastiko granulių.

Stiprio lenkiant bandymams buvo suformuotos 3 prizmės, kurių matmenys – 150 x 17,5 x 40 mm.

Stiprio gniuždant bandymams suformuoti 3 kubeliai, kurių matmenys – 40 x 18 x 40 mm.

HDPE ir devulkanizuotos padangų gumos (DPG) mišinio ruošimas

Ruošiant HDPE ir DPG mišinį, plastiko granulės ir DPG buvo sumaišyti ir sudėti į formą. Tada forma įdėta į kaitinimo krosnį, įkaitintą iki 300°C ir mišinys kaitinamas 60 min., iki kol plastiko granulės susilydė į vientisą masę.

Bandymams su HDPE ir DPG mišiniu buvo suformuota mažiausiai po tris kiekvienos rūšies bandinius. 1 m³ mišinio sudėtis pateikiama 2.2.1 lentelėje.

Stiprio lenkiant bandymams buvo suformuotos 3 prizmės, kurių matmenys – 150 x 26,5 x 40 mm.

Stiprio gniuždant bandymams suformuoti 4 kubeliai, kurių matmenys – 40 x 26 x 40 mm.

2.2.1 lentelė. HDPE ir DPG mišinio 1 m³ sudėtis

HDPE, kg	DPG, kg	HDPE/DPG
653	280	2,33

HDPE ir smėlio mišinio ruošimas

Ruošiant HDPE ir smėlio mišinį, smėlis buvo įkaitintas iki 300°C ir sumaišomas su plastiko granulėmis. Tada mišinys sudedamas į formą. Forma įdedama į kaitinimo krosnį, įkaitintą iki 300°C ir mišinys kaitinamas 60 min., iki kol plastiko granulės susilydė į vientisą masę.

Bandymams su HDPE ir smėlio mišiniu buvo suformuota mažiausiai po tris kiekvienos rūšies bandinius. 1 m³ mišinio sudėtis pateikiama 2.2.2 lentelėje.

Stiprio lenkiant bandymams buvo suformuotos 3 prizmės, kurių matmenys – 150 x 14,5 x 40 mm.

Stiprio gniuždant bandymams suformuoti 4 kubeliai, kurių matmenys – 40 x 13,5 x 40 mm.

2.2.2 lentelė. HDPE ir smėlio mišinio 1 m³ sudėtis

HDPE, kg	Smėlis, kg	HDPE/Smėlis
842	149	5,65

Ypač lengvo betono su plastiko granulėmis mišinio ruošimas

Ruošiant ypač lengvo betono su plastiko granulėmis mišinį visos medžiagos buvo dozuojamos pagal masę. Naudota betono sudėtis pateikiama 2.2.3 lentelėje.

2.2.3 lentelė. Ypač lengvo betono su plastiko granulėmis mišinio sudėtis

Vanduo, g	Cementas, g	V/C	Gipsas, g	NaOH, g	Al pudra, g	Plaušas, g	Plastikas, g
924,75	1308,60	0,71	3,60	5,40	1,35	3,67	112,37

Ruošiant mišinį, pirmiausia vandenyje buvo ištirpinamas NaOH. Tada į maišymo talpą buvo supiltas cementas ir vanduo. Vandens ir cemento mišinys buvo maišomas 2 min. elektriniu maišytuvu, kurio greitis 1600 aps./min. Praėjus 2 min., į cemento mišinį supiltas NaOH tirpalas. Po

15 sek. sudedamas plaušas, dar po 15 sek. supilama Al pudra ir dar po 15 sek. suberiamas gipsas ir plastiko granulės. Norint išgauti tinkamą ypač lengvo betono mišinį, medžiagų sudėjimo eiliškumas yra privalomas. Sudėjus visas medžiagas viskas maišoma 1 min. Sumaišius medžiagas, mišinys supilamas į formas (2.2.3 pav.), užpildant jas 60-70 %, kad mišinys turėtų vietos plėtimuisi. Maišymo procedūra pateikiama 2.2.4 lentelėje.

2.2.4 lentelė. Ypač lengvo betono su plastiko granulėmis maišymo procedūra

Eil. Nr.	Maišymo laikas, s	Maišymo procedūra
1	-	Vandenyje ištirpinamas NaOH
2	120	Vanduo maišomas su cementu
3	15	Supilamas NaOH tirpalas
4	15	Įdedamas plaušas
5	15	Suberiama Al pudra
6	15	Suberiamas gipsas ir plastiko granulės
7	60	Sudėjus visas medžiagas maišomas mišinys



2.2.3 pav. Besiplečiantis ypač lengvo betono mišinys formoje

3. EKSPERIMENTINĖ DALIS

3.1. Perdirbamo plastiko žaliavos paruošimo technologija

Apžvelgiant literatūros analizę galima matyti, kad plastiko atliekos gali būti naudojamos kuriant naujus produktus, bandiniu, naudojant jas statybos produktų gamyboje, tačiau prieš tai turi būti tinkamai paruoštos perdirbimo procesui.

Ruošiant plastiko žaliavą buvo naudojama technologinė schema, pateikiama 3.1.1 paveikslėlyje.



3.1.1 pav. Perdirbamo plastiko žaliavos paruošimo technologija (sudaryta autoriaus)

Tyrimuose buvo naudojamas HDPE plastikas, kuris gali būti naudojamas buityje. Tai gali būti įvairios dėžutės, kanistrai, cheminių ir valymo priemonių taros. Pirmiausia, nuo plastiko atliekų buvo nuvalytos visos etiketės ir užrašai, tarų vidus išplautas (3.1.1 pav. a). Atliekos turi būti švarios, kadangi nešvarumai gali pabloginti plastiko savybes ir likę įvairių cheminių medžiagų likučiai, perdirbimo proceso metu, gali išskirti pavojingas medžiagas.

Nuvalius plastiko atliekas, jos rankiniu būdu susmulkinamos į gabalėlius (3.1.1 pav. b), kurių dydis <50 mm, kad jas būtų galima lengviau transportuoti ir sutalpinti į smulkintuvo piltuvą.

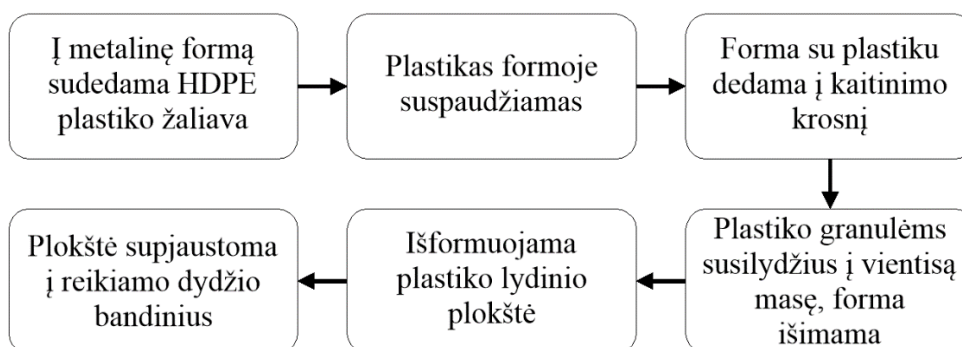
Plastiko gabalėliams susmulkinti, naudojami smulkintuvai (3.1.1 pav. c). Smulkintuvu plastiko gabalėliai yra susmulkinami į granules, kurių dydis <10 mm (3.1.1 pav. d).

Susmulkinus plastiko atliekas iki granulių, medžiagą patogų transportuoti bei sandėliuoti, ir ji paruošta tolimesniam perdirbimo procesui.

3.2. Kontrolinė HDPE plastiko perdirbimo technologija

Turint susmulkintą ir perdirbimui paruoštą plastiko žaliavą, galima pradėti perdirbimo procesą, kuriant bandinius. Norint perdirbti plastiką, reikalinga atitinkama gamybos technologija, leidžianti pakankamai greitai ir efektyviai atlikti procesą.

Pirmiausia, kuriant perdirbimo technologiją, buvo naudojama perdirbimo procedūra, kuri pateikiama 3.2.1 paveikslėlyje.



3.2.1 pav. Kontrolinė plastiko perdirbimo procedūra

Šio etapo metu buvo tiriama plastiko elgsena, jį lydant kaitinimo krosnyje ir išformuojant. Paruošta plastiko žaliava buvo sudėta į metalinę formą, kurios matmenys 300 x 300 x 60 mm. Formoje buvo įmontuotas srieginis spaustuvai, kuriuo plastiko granulės suspaudžiamos formos viduje. Sudėjus plastiką į formą ir suspaudus spaustuvu, forma dedama į kaitinimo krosnį, įkaitintą iki 300°C. Tada, maždaug 60 min., plastiko granulės buvo kaitinamos krosnyje, iki kol išsilydė ir pavoito tirsta mase ir pradėjo skverbtis pro formos kraštus. Tada plastiko lydinys kartu su forma buvo paliktas parai laiko kietėti. Po paros laiko, iš formos buvo išformuota plastiko plokštė ir supjaustyta į reikiamo dydžio bandinius.

Kuriant kontrolinius bandinius pagal aprašytą technologiją, buvo susidurta su keletu problemų. Dėl iki aukštos temperatūros įkaitusios formos, teko pakankamai ilgai laukti, kol plastiko lydinys

sukietės ir jį bus galima išformuoti. Vėliau, išformuojant bandinį, tai buvo keblu tai atlikti, nes plastikas stipriai prilipo prie formos sienelių. Dar, išformavus plastiko plokštę buvo pastebėta, kad jos paviršiai labai nešvarūs ir netolygūs (3.2.2 pav.). Prie plastiko plokštės paviršių prilipo visi nešvarumai, buvę ant metalinės formos paviršių ir šių nešvarumų nuvalyti nebuvo galima.



3.2.2 pav. Kontrolinio bandinio paviršius

Vėliau, pjaustant plastiko lydinio plokštę į bandinius buvo pastebėta, kad bandinio viduje susidariusios ertmės, dalis plastiko granulių vis dar neišsilydžiusios ir bandinio storis labai netolygus. Plastiko plokštės skerspjūvio vaizdą galima matyti 3.2.3 paveikslėlyje.



3.2.3 pav. Kontrolinio bandinio skerspjūvis

Kontrolinio bandinio plastiko plokštė buvo supjaustyta į prizmes. Vėliau buvo nustatytoas prizmių tankis, duomenys pateikiami 3.2.1 lentelėje. Pagal duomenis galima matyti labai didelius prizmių tankio skirtumus, prizmių tankis kito nuo 695,59 iki 943,14 kg/m³. Pagal Kizinievič ir Žurauskienės pateikiamus duomenis 1.2.3 lentelėje matoma, kad didelio tankio polietileno (HDPE) tankis turėtų būti 940-960 kg/m³. Tokius tankio skirtumus galėjo įtakoti anksčiau minėti bandinio defektai (ertmės, netolygus storis, neišsilydžiusios granulės).

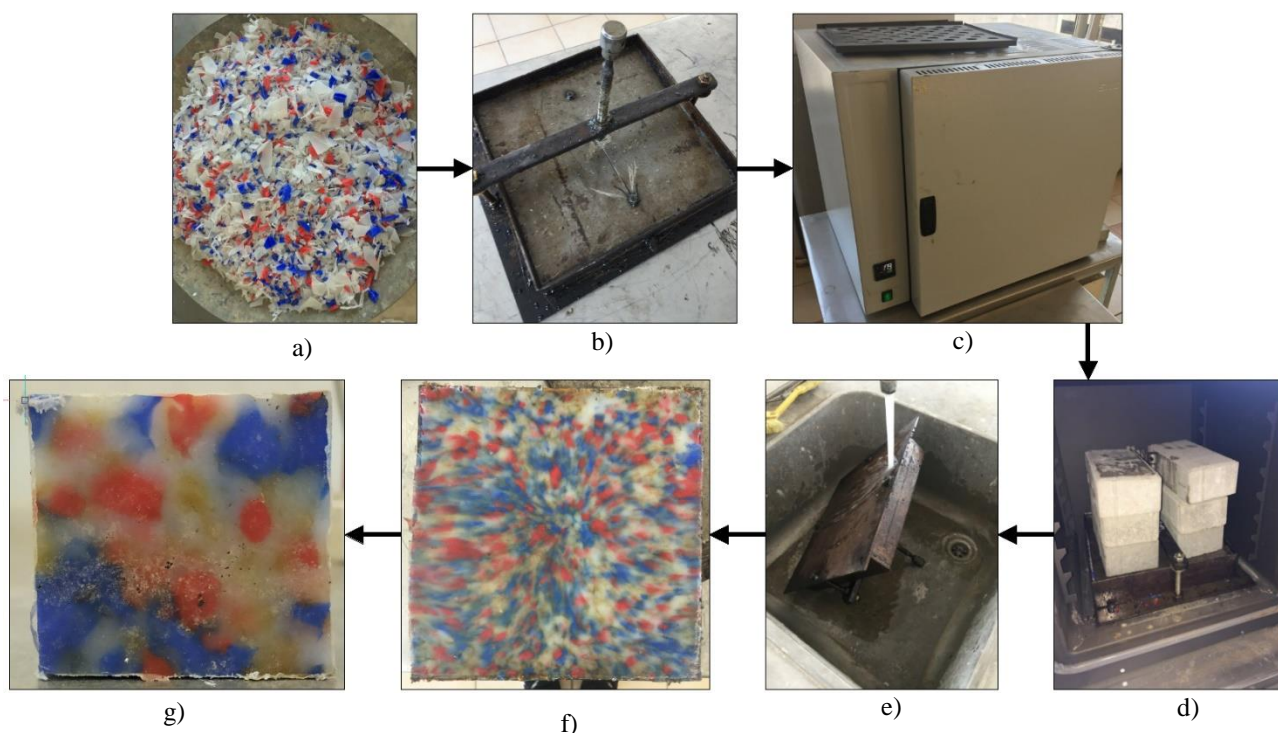
3.2.1 lentelė. Kontrolinio bandinio prizmių tankis

Bandinio Nr.	Tankis, kg/m³
HDPE100KN-1	943,14
HDPE100KN-2	845,32
HDPE100KN-3	819,44
HDPE100KN-4	841,94
HDPE100KN-5	717,64
HDPE100KN-6	695,59
HDPE100KN-7	743,32

Atlikus kontrolinius bandymus buvo susipažinta su plastiko perdirbimo technologijos procesu. Šių bandymų metu išaiškintos reikalingos proceso korekcijos, norint suformuoti kokybiškesnį bei tvirtesnį bandinį, ir tai padaryti paprasčiau, ir efektyviau.

3.3. Pakoreguota HDPE plastiko perdirbimo technologija

Pagal gautus rezultatus, atliekant kontrolinius technologinės procedūros bandymus, buvo sukurta pakoreguota perdirbimo technologija, kuri pateikiama 3.3.1 paveikslėlyje.



3.3.1 pav. Pakoreguota plastiko perdirbimo technologija

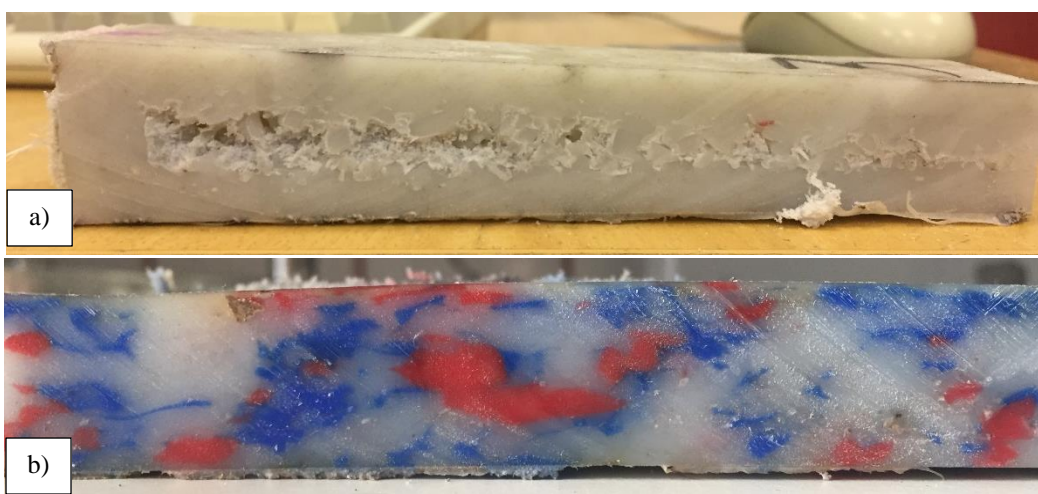
Pirmiausia, paimamas ir pasveriamas reikiamo plastiko granulių kiekis (3.3.1 pav. a). Tada, nuo metalinės formos (3.3.1 pav. b) kruopščiai nuvalomi visi nešvarumai, taip bandinių paviršius nebus apterštas. Nuvalius nešvarumus, visi formos paviršiai tolygiai padengiami alyva, kad lydiny susilipėtų prie formos paviršių ir jį būtų lengviau išformuoti. Paruošus plieninę formą į ją supilamos plastiko granulės. Pripildžius formą plastiką, uždedamas viršutinis dangtis, kuris suslegiamas įmontuotu srieginiu spaustuviu, kad plastikas susitankintų ir būtų išgaunama geresnė bandinio forma bei paviršiai. Tada paruošiama kaitinimo krosnis (3.3.1 pav. c), į kaitinant ją iki 300°C temperatūros. Vėliau į įkaitintą kaitinimo krosnį įdedama plieninė forma, su plastiko granulėmis ir ant jos uždedama papildoma apkrova (3.3.1 pav. d), dėl kurios plastiką geriau sutankinamas. Plastiko lydymo procesas trunka apie 60 min. Viso lydymo proceso metu, tam tikrais intervalais, forma yra ištraukiama ir

spaustuvas vis paveržiamas, kadangi lydantis nyksta oro tarpai, tūris mažėja ir spaudimas atsipalaiduoja. Kada plastikas išsilydo iki reikiamos konsistencijos, galima matyti, kai plastiko masė pradeda tekėti pro formos tarpus.

Kada matoma, kad pasiekta norima plastiko masės konsistencija, forma išimama. Išėmus formą, ji atvėsinama vandeniui (3.3.1 pav. e). Atšaldymas neturi įtakos produkto kokybei ir šio etapo metu žymiai pagreitinamas procesas, kadangi nereikia laukti, kol forma atvės. Formą atvėsinus, bandinius galima beveik iš karto išformuoti (3.3.1 pav. f).

Atlikus visą plastiko plokštės gamybos procesą, plokštė staklėmis supjaustoma į norimo dydžio bandinius (3.3.1 pav. g).

Formuojant bandinį iš HDPE plastiko, pagal pakoreguotą technologiją buvo matomas akivaizdus bandinių kokybės skirtumas (3.3.2 pav.). Bandinio viduje neliko ertmių ir tarpusavyje nesusilydžiusių plastiko granulių. Išformuotos plokštės storis buvo pakankamai tolygus, per visą plokštės tūrį. Forma buvo sutepta alyva, todėl išformavimas buvo žymiai paprastesnis. Dalis alyvos, kuria buvo sutepta forma, įsigėrė į bandinio paviršius, dėl to paviršius šiek tiek parudavo, tačiau paviršiaus kokybei įtakos neturėjo. Paviršiai buvo glotnūs ir be nešvarumų. Atvėsinus formą vandeniui buvo galima iš karto išformuoti bandinį.

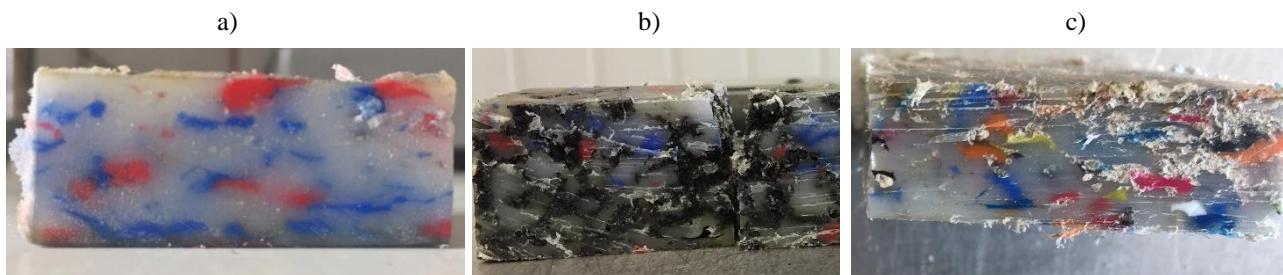


3.3.2 pav. Kontrolinės technologijos bandinys (a) ir pakoreguotos technologijos bandinys (b)

Ši technologija vėliau buvo naudojama kuriant bandinius, su skirtingomis sudėtimis.

3.4.Sukurti bandiniai

Mechaninių ir fizikinių savybių tyrimams atlikti, buvo sukurti trijų skirtingų sudėčių bandiniai: HDPE100 (3.4.1 pav. a), tai gryno 100 % HDPE plastiko bandinys, HDPE70DPG30 (3.4.1 pav. b), tai 70 % HDPE plastiko ir 30 % devulkanizuotos padangų gumos (DPG) mišinys ir HDPE85SM15 (3.4.1 pav. c), yra 85 % HDPE plastiko ir 15 % smėlio mišinys.



3.4.1 pav. Tyrimuose naudojamo bandinių skerspjūviai

3.5.Tankio nustatymas

3.5.1 lentelėje pateikiami visų trijų sudėčių bandinių tankiai.

3.5.1 lentelė. Bandinių tankiai

Bandinys	Tankis, kg/m ³
HDPE100P-1	944,30
HDPE100P-2	902,43
HDPE100P-3	922,88
HDPE100K-1	932,39
HDPE100K-2	928,33
HDPE100K-3	962,20
HDPE70DPG30P-1	798,51
HDPE70DPG30K-1	786,85
HDPE70DPG30K-2	777,04
HDPE70DPG30K-3	797,54
HDPE70DPG30K-4	821,26
HDPE85SM15P-1	968,00
HDPE85SM15P-2	1083,66
HDPE85SM15P-3	1028,28
HDPE85SM15K-1	921,42
HDPE85SM15K-2	1113,97
HDPE85SM15K-3	1034,89

Pastaba: priedašai prie bandinių pavadinimų rodo bandinio numerį ir ar tai yra prizmė (P), ar kubelis (K).

Lyginant kontrolinio (HDPE100KN) ir pakoreguotos technologijos (HDPE100) bandinių tankio rezultatus galima matyti, jog HDPE100 bandinių tankis žymiai didesnis, nei HDPE100KN ir artimesnis tikrajam (1.2.3 lentelė). Taip pat, HDPE100 bandinių tankis kinta žymiai mažesnėse ribose, t. y. maksimalus tankių skirtumas – 42 kg/m³, o HDPE100KN maksimalus tankių skirtumas – 248 kg/m³. Tai parodo, kad HDPE100 bandiniai buvo žymiai kokybiškesni.

Lyginant HDPE100 ir HDPE70DPG30 duomenis galima matyti, kad HDPE100 bandinių tankis buvo apie 15 % didesnis. Vidutinis HDPE100 bandinių tankis siekė apie 932 kg/m³, o HDPE70DPG30 bandinių apie 796 kg/m³. Galima pastebėti, kad HDPE70DPG30 bandinių tankiai pasiskirstę pakankamai tolygiai, ir maksimalus tankių skirtumas yra 44 kg/m³.

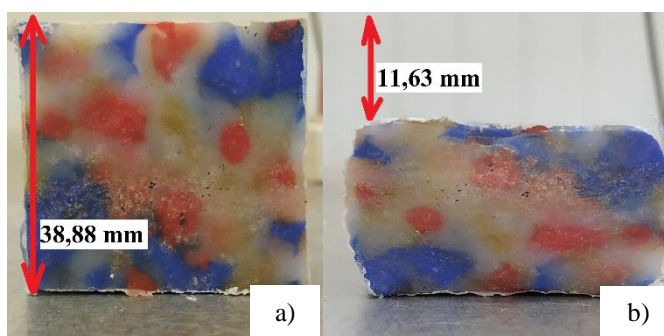
Apžvelgiant lentelėje pateikiamus HDPE85SM15 bandinių tankio duomenis matoma, kad dėl sudėtyje atsiradusio smėlio bandinių tankis, lyginant su HDPE100, išaugo apie 10 %. Vidutinis HDPE85SM15 mišinio bandinių tankis siekė 1025 kg/m³. Dar galima pastebėti, kad bandinių tankis buvo labai nevienodas ir maksimalus tankių skirtumas siekė 193 kg/m³, taip įvyko dėl labai netolygaus smėlio pasiskirstymo bandinių tūryje.

3.6. Stiprio gniuždant nustatymas

Bandinių irimo požymiai

Atliekant stiprio gniuždant bandymą buvo pastebėta, jog visų sudėčių bandiniai patiria plastines deformacijas. Dėl tokio deformacijų tipo bandiniuose neatsiranda įtrūkimų, o juos gniuždant jie bliūkšta ir tankinasi. Įtrūkimams neatsirandant hidraulinis presas nenustoja gniuždyti bandinio, todėl buvo stengiamasi bandymą sustabdyti bandiniams pasiekus maždaug 30-40 % aukščio deformaciją.

3.6.1 paveikslėlyje galima matyti HDPE100 bandinį, prieš (3.6.1 pav. a) ir po (3.6.1 pav. b) stiprio gniuždant bandymo. Šiame paveikslėlyje matoma, kad bandinys patyrė negrįžtamą deformaciją ir susiplojęs susitankino, bandinio aukščio skirtumas po bandymo buvo 11,63 mm.



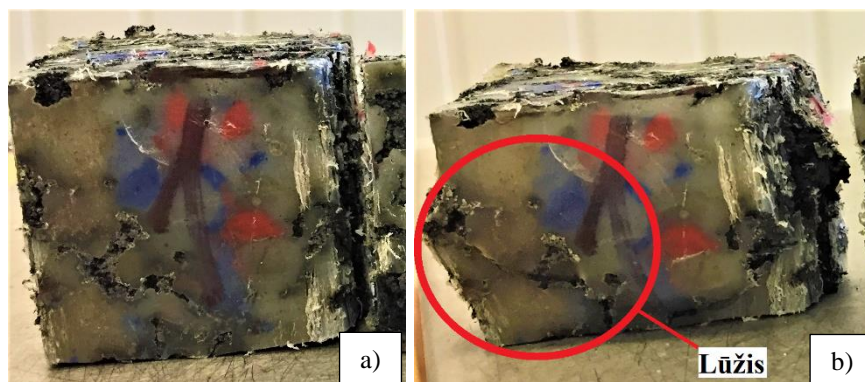
3.6.1 pav. HDPE100 kubelis prieš (a) ir po (b) stiprio gniuždant bandymo

3.6.2 paveikslėlyje matomas HDPE70DPG30 bandinio skerspjūvis. Kaip galima pastebėti, plastikas ir guma nesusilydė į vieną masę, nes padangų guma yra apdirbta su anglies ir kitais elementais, neleidžiančiais jai degti ar lydėtis (www.sciencing.com).



3.6.2 pav. HDPE70DPG30 bandinio skerspjūvis

Stiprio gniuždant bandymo metu, HDPE70DPG30 bandinių irimo pobūdis buvo panašus į gryno plastiko bandinių. Bandiniai patyrė negrįžtamą deformaciją, susitankindami ir susiplodami. Visi bandiniai taip pat iro plastiškai. 3.6.3 paveikslėlyje galima matyti HDPE70DPG30 bandinį prieš (a) ir po (b) stiprio gniuždant bandymo. Tačiau, kitaip nei HDPE100 plastiko bandiniuose, HDPE70DPG30 mišinio bandinių paviršiuose atsirado lūžiai, kurie buvo ties gumos gabalėliais (3.6.3 pav. b).



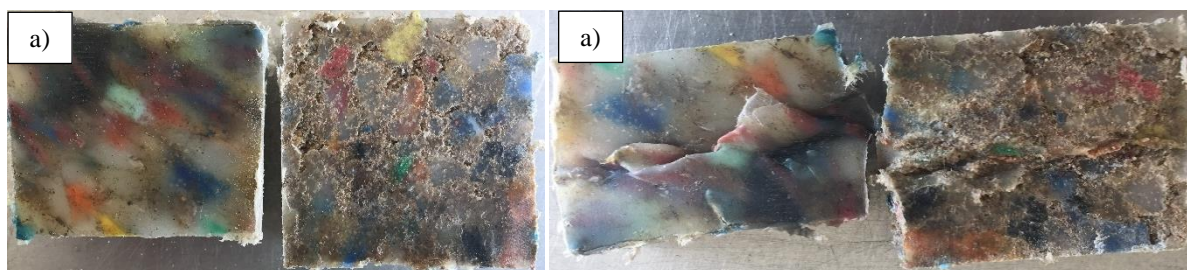
3.6.3 pav. HDPE70DPG30 bandinys prieš (a) ir po (b) stiprio gniuždant bandymo

Kuriant HDPE85SM15 bandinius buvo susidurta su problema, kad subėrus smėlį ant plastiko granulių smėlis subyrėdavo į formos apačią ir nepasiskirstydavo per formuojamo bandinio tūrį. Siekiant pagerinti situaciją smėlis buvo įkaitintas iki 300°C temperatūros, tada maišomas su plastiko granulėmis, tikintis, kad prilips prie plastiko granulių sienelių. Tačiau prie plastiko granulių prilipo tik labai maža dalis, o likusi dalis subyrėjo į formos apačią. Smėlio pasiskirstymas tūryje buvo menkas ir didžiausia smėlio koncentracija liko formos apačioje. Smėlio pasiskirstymą galima matyti 3.6.4 paveikslėlyje, kuriame pavaizduoti bandinių skerspjūviai.



3.6.4 pav. HDPE85SM15 bandinių skerspjūvis

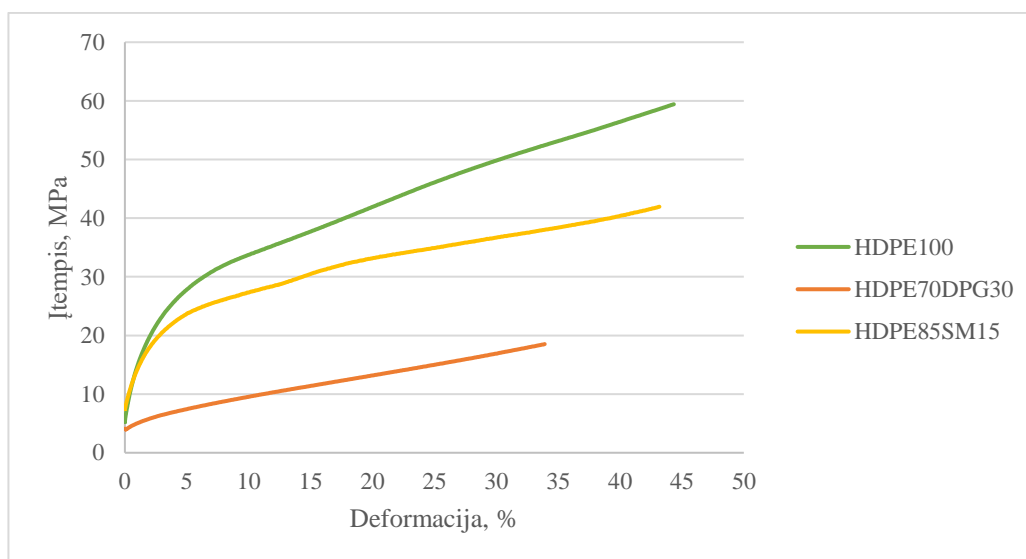
Atliekant stiprio gniuždant bandymą buvo pastebėta, kad HDPE85SM15 kubelių paviršiai lūžta, panašiai kaip HDPE70DPG30 bandinių, ir atplyšę paviršiaus sluoksniai prasikeičia vienas kito atžvilgiu (3.6.5 pav.).



3.6.5 pav. HDPE85SM15 bandiniai prieš (a) ir po (b) stiprio gniuždant bandymo

Bandymų rezultatai

3.6.6 paveikslėlyje pateikiamose įtempių-deformacijų kreivėse, matomi visų trijų sudėčių bandinių stiprio gniuždant bandymų rezultatai.



3.6.6 pav. Stiprio gniuždant bandymų įtempių-deformacijų kreivės

Apžvelgiant bandinių irimo požymius galima pastebėti, kad HDPE100 bandiniai iro plastiškai ir juose nebuvo jokių įtrūkimų ar lūžių paviršiuose, tai parodo aukštesnę bandinių kokybę, lyginant su HDPE70DPG30 ir HDPE85SM15 bandiniais. Kaip galima matyti pagal 3.6.6 paveikslėlio duomenis, HDPE100 bandiniai parodė didžiausią stiprį gniuždant, kuris buvo 17 MPa.

Lyginant HDPE 100 ir HDPE70DPG30 tyrimų rezultatus (3.6.6 pav.) galima matyti, kad HDPE70DPG30 bandinių stipris gniuždant buvo daugiau kaip keturis kartus mažesnis ir siekė tik 4 MPa. Taip galėjo nutikti, nes mišinyje naudotas 30 % devulkanizuotos padangų gumos kiekis buvo per didelis. Dėl to bandinių paviršių kokybė buvo žymiai prastesnė, atsirado įtrūkimai ir paviršių lūžiai, tai galėjo įtakoti stiprį gniuždant.

Pagal HDPE85SM15 įtempių-deformacijų kreivę (3.6.6 pav.) galima matyti, kad šio mišinio stipris gniuždant siekė 12 MPa. Lyginant su HDPE100 stipriu, kuris buvo 17 MPa, galima matyti beveik 30 % stiprio kritimą. Galimai toks stiprio kritimas galėjo būti dėl blogo smėlio pasiskirstymo bandinių tūryje. Tikėtina, kad esant efektyvesnei plastiko-smėlio mišinio bandinių gamybos technologijai, jei smėlis būtų tolygiai pasiskirstęs per visą bandinių skerspjūvį, stiprio gniuždant metu pasiekti įtempiai ir tikrasis stipris būtų žymiai aukštesni.

3.7. Stiprio lenkiant nustatymas

Bandinių irimo požymiai

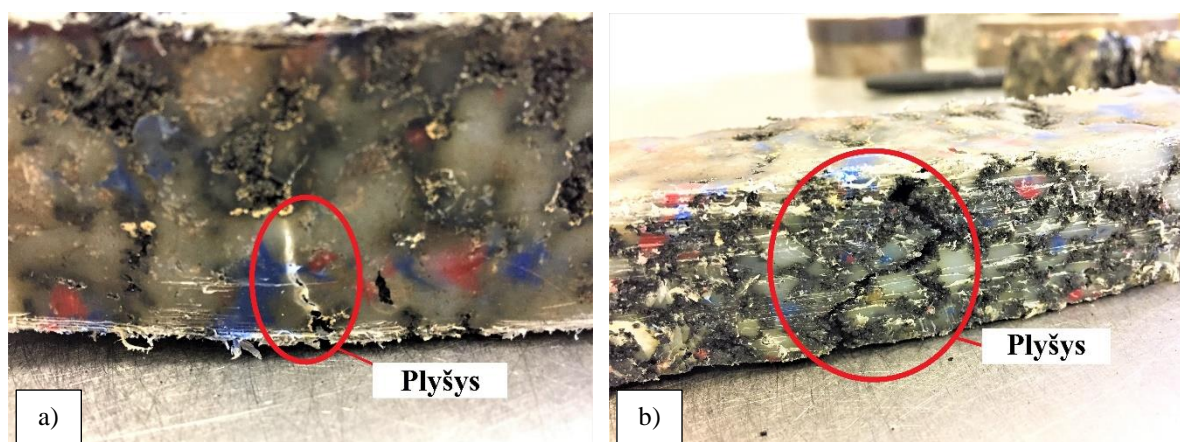
Atliekant HDPE100 prizmės stiprio lenkiant bandymą buvo pastebėta, jog bandinys iro plastiškai ir neatsivėrė plyšys, o vidurio taške, tempiamųjų sluoksnių zonoje, ištįso ir pailgėjo, kaip matoma 3.7.1 paveikslėlyje.



3.7.1 pav. HDPE100 prizmė, po stiprio lenkiant bandymo

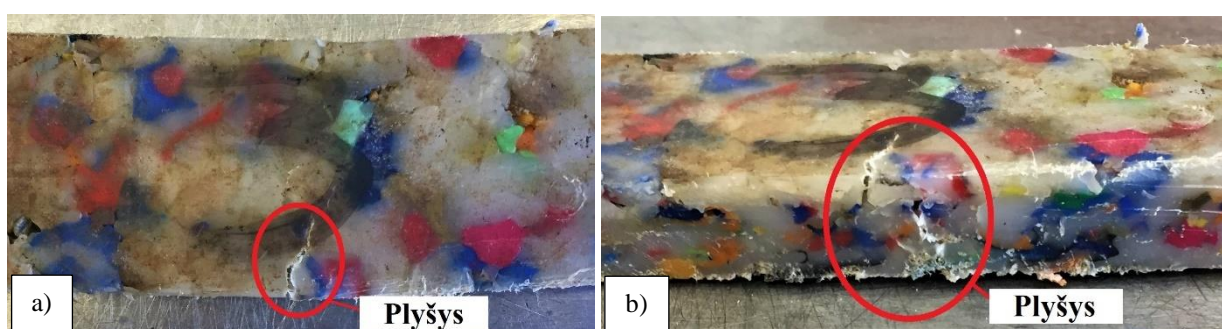
Lyginant HDPE100 ir HDPE70DPG30 prizmių suirimą galima matyti, jog kitaip nei HDPE100 plastiko prizmė (3.7.1 pav.), HDPE70DPG30 mišinio prizmė vidurio taške ne ištįso ir pailgėjo, o

atsivėrė plyšys tempiamųjų sluoksnių zonoje (3.7.2 pav. a). Taip pat galima pastebėti, kad plyšys atsivėrė tik vietose, kuriose vyravo gumos koncentracija (3.7.2 pav. b).



3.7.2 pav. HDPE70DPG30 prizmė, po stiprio lenkiant bandymo

HDPE85SM15 prizmės stiprio lenkiant bandymo metu buvo pastebėta, kad jos irimas panašus į HDPE70DPH30 prizmės. HDPE85SM15 prizmės tempiamųjų sluoksnių zonoje taip pat atsivėrė plyšys (3.7.3 pav. a). Dar galima atkreipti dėmesį, kad plyšio išsišakojimas nukrypo į zoną, kurioje buvo didesnė smėlio koncentracija (3.7.3 pav. b). Tikėtina, kad buvus tolygiam smėlio pasiskirstymui per bandinio tūrį, bandinys būtų suiręs analogiškai HDPE70DPG30 bandiniui ir plyšys būtų atsivėręs tik tose vietose, kur vyrautų smėlio koncentracija.



3.7.3 pav. HDPE85SM15 prizmė, po stiprio lenkiant bandymo

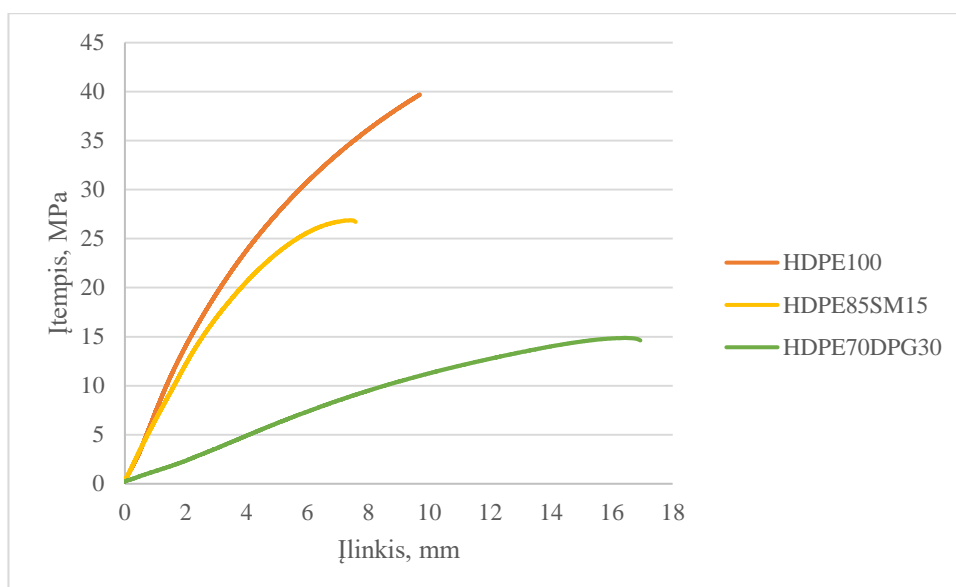
Bandymų rezultatai

3.7.1 lentelėje pateikiami visų trijų sudėčių bandinių stiprio lenkiant bandymo rezultatai. Lentelėje pateikiami maksimalūs pasiekti įtempiai, bandinių įlinkis ir apskaičiuota tamprumo modulio reikšmė.

3.7.1 lentelė. Bandinių stiprio lenkiant bandymo rezultatai

Bandinys	Įtempiai, MPa	Įlinkis, mm	Tamprumo modulis, GPa
HDPE100P-1	39,21	7,97	0,209
HDPE100P-2	28,97	6,35	0,183
HDPE100P-3	39,70	7,18	0,230
HDPE70DPG30P-1	14,88	16,43	0,040
HDPE85SM15P-1	26,88	7,88	0,135
HDPE85SM15P-2	25,01	7,80	0,133
HDPE85SM15P-3	21,56	5,67	0,123

Atlikus trijų taškų lenkimo bandymą buvo gautos įtempių-įlinkio kreivės, kurios pateikiamos 3.7.4 paveikslėlyje.



3.7.4 pav. Stiprio lenkiant bandymų įtempių-įlinkio kreivės

Kaip galima matyti, kreivės kinta beveik tiesiškai, iki kol bandiniai suyra. Taip pat, kaip ir stiprio gniuždant bandymo metu, didžiausius įtempius atlaikė HDPE100 bandiniai.

HDPE100 prizmės suiro pasiekusios 28,97-39,70 MPa įtempius, kai įlinkis buvo 6,35-7,97 mm. Apskaičiuotas tamprumo modulis gautas 0,183–0,230 GPa.

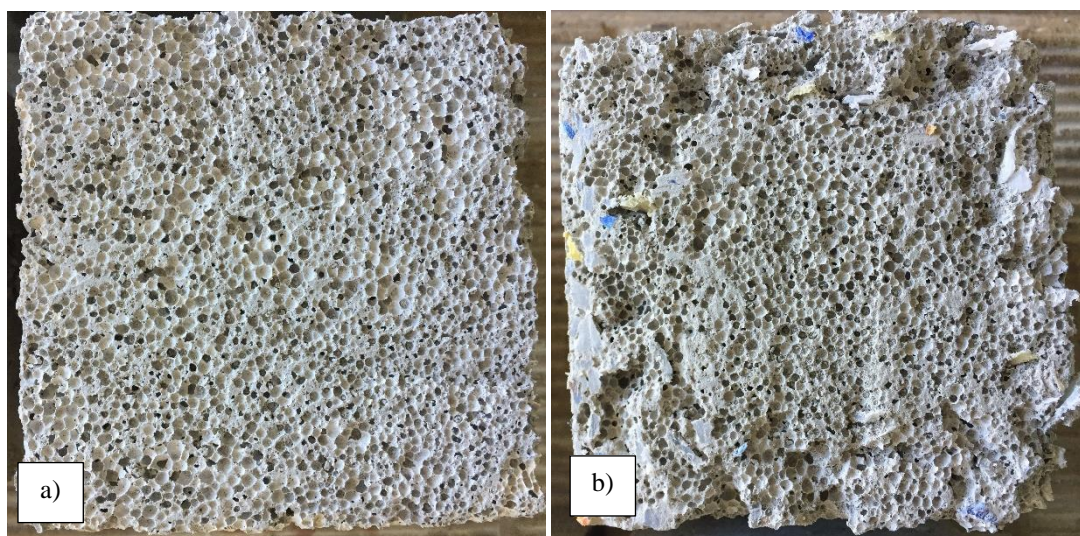
Lyginant HDPE100 ir HDPE70DPG30 lenkimo bandymo rezultatus galima matyti, kad bandinių stipris lenkiant sumažėjo daugiau kaip du kartus, ir siekė tik 14,88 MPa, o plyšys atsivėrė bandiniui įlinkus 16,43 mm. Tamprumo modulis nukrito nuo 0,230 GPa iki 0,040 GPa, t. y. sumažėjo daugiau kaip 80 %.

HDPE85SM15 bandinių stipris lenkiant, lyginant su HDPE100, sumažėjo daugiau kaip 30 % ir siekė 21,56-26,88 MPa. Bandiniai suiro, kai įlinkis buvo 5,67-7,88 mm. Tamprumo modulis sumažėjo beveik dvigubai, lyginant su gryno plastiko bandinių (0,21 GPa), ir siekė apie 0,13 GPa.

Maksimalūs pasiekti įtempiai sumažėjo iki 12,5 MPa, t. y. beveik tris kart mažiau, lyginant su gryno plastiko bandiniu. Bandinių laikomoji galia siekė 2-4,5 kN ir įtrūkimai atsirado bandiniams įlinkus maždaug 6-8 mm. Tamprumo modulis sumažėjo beveik dvigubai, lyginant su HDPE100 bandinių (0,230 GPa), ir siekė apie 0,123-0,135 GPa.

3.8. Ypač lengvo betono su HDPE plastiko granulėmis savybės

Kaip buvo minėta literatūros analizėje, yra atliekami įvairūs bandymai, kuriuose plastiko granulės integruojamos į betono mišinį, kaip užpildas. Buvo atliktas tyrimas, kurio metu plastiko granulės buvo integruojamos gaminant ypač lengvą betoną. Ypač lengvu betonu laikomas toks betonas, kurio tankis yra apie 300 kg/m³ ir stipris gniuždamas siekia 3 MPa. 3.8.1 paveikslėlyje (a) galima matyti įprasto ypač lengvo betono mišinio bandinį, o 3.8.1 paveikslėlyje (b) ypač lengvo betono su plastiko granulėmis mišinio bandinį.



3.8.1 pav. Ypač lengvo betono mišinio bandinys be plastiko granulių (a) ir su plastiko granulėmis (b)

Suformuoti ypač lengvo betono su plastiko granulėmis bandiniai buvo tris paras palikti kietėti. Po trijų parų bandiniai buvo išformuoti. Išėmus bandinius iš formų buvo pastebėtas nemažas drėgmės kiekis, susikaupęs bandiniuose. Norint išdžiovinti bandinius ir pašalinti drėgmę bandiniai parai laiko buvo įdėti į kaitinimo krosnį, 100°C temperatūroje. Po paros laiko, krosnis buvo išjungta ir bandiniai palikti dar parai laiko, kad galėtų palaispniui atvėsti kaitinimo krosnyje, nesukeliant bandiniams momentinio didelio temperatūrų skirtumo.

Bandiniams atvėsus, jie buvo išimti iš kaitinimo krosnies. Apžiūrėjus bandinius buvo pastebėti įtrūkimai, ties plastiko granulėmis, per visą bandinio tūrį (3.8.2 pav.).



3.8.2 pav. Įtrūkimai ypač lengvo betono su plastiko granulėmis bandinyje

Ypač lengvo betono bandiniuose įtrūkimai greičiausiai atsirado dėl 100°C temperatūroje pradėjusių lydėtis ir keisti savo tūrį HDPE plastiko granulių. Manoma, kad pradėjusios lydėtis granulės šiek tiek padidino savo tūrį, taip versdamos betoną įtrūkti. Šie įtrūkimai beveik dvigubai sumažino betono bandinių stiprį gniuždant, lyginant su įprasto ypač lengvo betono mišinio. Atlikus stiprio gniuždant bandymą maksimalūs pasiekti įtempiai buvo tik 1,78 MPa. Ypač lengvo betono bandinių su plastiko granulėmis, kurie nebuvo kaitinami krosnyje, stipris gniuždant buvo apie 3,00 MPa.

Dėl šios priežasties nerekomenduotina naudoti HDPE plastiko granules, kaip užpildą ypač lengvo betono konstrukcijose. 100°C temperatūra nėra didelė ir gali susidaryti net buitinėmis sąlygomis, nuo virdulio garų, esant karštai dienai saulės atokaitoje. Tikėtina, kad gaisro atveju, kada temperatūros gali pakilti net iki 1000°C laipsnių, plastiko granulės betono konstrukcijose dar intensyviau keistų savo formą ir plastiko granulių deformacijos turėtų dar didesnę įtaką konstrukcijų stiprumui.

IŠVADOS

1. Sukurtos didelio tankio polietileno (HDPE) žaliavos paruošimo ir perdirbimo technologijos, leidžiančios itin paprastai ir efektyviai atlikti perdirbimo procedūras.
2. Sukurti keturių skirtingų sudėčių bandiniai: plastiko – kontrolinės perdirbimo technologijos (HDPE100KN), plastiko – pakoreguotos perdirbimo technologijos (HDPE100), plastiko-devulkanizuotos padangų gumos mišinio (HDPE70DPG30) ir plastiko-smėlio mišinio (HDPE85SM15). Visi bandiniai sukurti naudojant perdirbtas vietines HDPE tipo plastiko atliekas.
 - 2.1. Ištirtos sukurtų bandinių fizikinės ir mechaninės savybės. Pagal gautus rezultatus didžiausias stiprumas buvo pasiektas plastiko pakoreguotos perdirbimo technologijos (HDPE 100) bandiniuose. Vidutinis bandinių tankis – 932 kg/m^3 , stipris gniuždant – 16,00-17,00 MPa, stipris lenkiant – 28,97-39,70 MPa, tamprumo modulis – 0,183-0,230 GPa.
 - 2.2. Lyginant HDPE100, HDPE70DPG30 ir HDPE85SM15 bandymų rezultatus galima teigti, kad papildomos medžiagos dedamos į HDPE plastiko bandinius tik pablogino jų mechanines savybes. HDPE70DPG30 bandinių stipris gniuždant sumažėjo daugiau kaip keturis kartus ir buvo tik 4,00 MPa, o HDPE85SM15 bandiniuose krito per 30 % ir siekė 12,00 MPa. HDPE70DPG30 bandinių stipris lenkiant buvo per pus mažesnis (14,88 MPa), o HDPE85SM15 bandinių stipris lenkiant buvo 21,56-26,88 MPa, t. y. kaip ir stipris gniuždant sumažėjo daugiau kaip 30 %.
3. Sukurti ypač lengvo betono su HDPE plastiko granulėmis bandiniai. Bandiniai buvo pakaitinti 100°C temperatūroje, norint pašalinti susikaupusią drėgmę. Kaitinant krosnyje HDPE granulės pradėjo deformuotis ir bandiniuose, ties plastiko granulėmis atsirado įtrūkimai. Bandinių stipris gniuždant, lyginant su įprasto ypač lengvo betono mišinio bandinių stipriu, buvo beveik du kart mažesnis ir siekė 1,78 MPa. Ypač lengvo betono bandinių su plastiko granulėmis, kurie nebuvo kaitinami krosnyje, stipris gniuždant buvo apie 3,00 MPa.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- ADHIKARY, Kamal B, PANG, Shusheng ir STAIGER, Mark P., 2008 Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering* [interaktyvus]. **39**(5), 807-815. [žiūrėta 208-12-15 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.compositesb.2007.10.005
- ALQAHTANI, Fahad K., et al., 2017 Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. **148**, 386-397. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.011>
- AL-SALEM, S. M.; LETTIERI, P. ir BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste management* [interaktyvus]. **29**(10): 2625-2643. [žiūrėta 208-12-15 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.wasman.2009.06.004
- ALZERRECA, Mathias, et al., 2015 Mechanical properties and molecular structures of virgin and recycled HDPE polymers used in gravity sewer systems. *Polymer Testing* [interaktyvus]. **46**, 1-8. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.06.012>
- American chemistry: Energy Recovery*. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://www.americanchemistry.com/Energy-Recovery/>
- Aplinkos apsaugos agentūra*. 2017 [žiūrėta 2017-12-17 d.]. Prieiga per: <http://atliekos.gamta.lt>
- ASARO, Lucia, et al., 2018 Recycling of rubber wastes by devulcanization. *Resources, Conservation and Recycling* [interaktyvus]. **133**, 250-262. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.016>
- BADACHE, Abdelhak, et al., 2018 Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. **163**, 40-52. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.069>
- BAJRACHARYA, Rohan Muni, et al., 2016 Characterisation of recycled mixed plastic solid wastes: Coupon and full-scale investigation. *Waste management* [interaktyvus]. **48**, 72-80. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.017>
- GRIGORIADOU, Ifigenia, et al., 2018 Comparative study of the photochemical stability of HDPE/Ag composites. *Polymer Degradation and Stability* [interaktyvus]. **153**, 23-36. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.016>
- HINISLIOĞLU, Sinan ir AĞAR, Emine., 2004 Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials letters* [interaktyvus]. **58**(3-4), 267-271. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00458-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00458-0)

- JAYARAMAN, Krishnan ir BHATTACHARYYA, Debes., 2004 Mechanical performance of woodfibre–waste plastic composite materials. *Resources, Conservation and Recycling* [interaktyvus]. **41**(4), 307-319. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2003.12.001>
- KEERTHANA, K. ir KISHEN, JM Chandra., 2018 An experimental and analytical study on fatigue damage in concrete under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue* [interaktyvus]. **111**, 278-288. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.02.014>
- KESKISAARI, Anna ir KÄRKI, Timo., 2018 The use of waste materials in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product. *Resources, Conservation and Recycling* [interaktyvus]. **134**, 257-261. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.023>
- KIZINIEVIČ, Olga ir ŽURAUŠKIENĖ, Ramunė. Inovatyvios polimerinės statybinės medžiagos ir dirbiniai. 2012.
- KUMI-LARBI JNR, Alexander, et al., 2018 Recycling waste plastics in developing countries: Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded blocks. *Waste management* [interaktyvus]. **80**, 112-118. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.003>
- LIETUVOS STANDATIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-3:2009]. *Betono bandymas. 3 dalis. Bandinių gniuždomasis stipris. Europos standartas EN 12390-3:2009 turi Lietuvos standarto LST EN 12390-3:2009 statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
- LIETUVOS STANDATIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-4:2003 lt]. *Betono bandymas. 4 dalis. Bandymo mašinų techniniai reikalavimai. Europos standartas EN 12390-4:2000 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003.
- LIETUVOS STANDATIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-5:2009]. *Betono bandymas. 5 dalis. Bandinių lenkiamasis stipris. Europos standartas EN 12390-5:2009 turi Lietuvos standarto LST EN 12390-5:2009 statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
- LIETUVOS STANDATIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-7:2009]. *Betono bandymas. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis. Europos standartas EN 12390-7:2009 turi Lietuvos standarto LST EN 12390-7:2009 statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.

LIETUVOS STANDATIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12620:2003+A1:2008]. *Betono užpildai. Europos standartas EN 12620:2002+A1:2008 turi Lietuvos standarto LST EN 12620:2003+A1:2008 statusą.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2008.

LIETUVOS STANDATIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 14889-2:2007 en]. *Betono pluoštai. 2 dalis. Polimeriniai pluoštai. Apibrėžtys, techniniai reikalavimai ir atitiktis. Europos standartas EN 14889-2:2006 turi Lietuvos standarto statusą.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.

LIETUVOS STANDATIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 197-1:2011]. *Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai. Europos standartas EN 197-1:2011 turi Lietuvos standarto statusą.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.

MIANDAD, R., et al., 2017 Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International biodeterioration & biodegradation* [interaktyvus]. **119**, 239-252. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.017>

NAJAFI, Saeed Kazemi., 2013 Use of recycled plastics in wood plastic composites—A review. *Waste management* [interaktyvus]. **33**(9), 1898-1905. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.017>

NKANGA, Utibe J., et al., 2017 Characterization of bitumen/plastic blends for flexible pavement application. *Procedia Manufacturing* [interaktyvus]. **7**, 490-496. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.051>

Precious Plastic. [žiūrėta 2017-12-16 d.]. Prieiga per: <https://preciousplastic.com>

RAGAERT, Kim, DELVA, Laurens ir VAN GEEM, Kevin, 2017 Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management* [interaktyvus]. **69**, 24-58. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

Rait: Lietuvos gyventojų požiūris į atliekų tvarkymo sistemą. 2017 [žiūrėta 2017-12-16 d.]. Prieiga per: www.rait.lt

REIS, J. M. L., PACHECO, L. J. ir DA COSTA MATTOS, H. S., 2014 Temperature and variable strain rate sensitivity in recycled HDPE. *Polymer Testing* [interaktyvus]. **39**, 30-35. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.07.011>

SAXENA, Rajat, et al., 2018 Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. **176**, 415-421. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.019>

Sciencing: How to Melt Rubber Tires. 2018 [žiūrėta 2018-12-13 d.]. Prieiga per: <https://sciencing.com/melt-rubber-tires-7552030.html>

- SEGHIRI, Mehdi, et al., 2017 The Possibility of Making a Composite Material from Waste Plastic. *Energy Procedia* [interaktyvus]. **119**, 163-169. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.065>
- SHARUDDIN, Shafferina Dayana Anuar, et al., 2017 Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy conversion and management* [interaktyvus]. **148**, 925-934. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.046>
- SIDDIQUE, Rafat, KHATIB, Jamal ir KAUR, Inderpreet., 2008 Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste management* [interaktyvus]. **28**(10), 1835-1852. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>
- SO, Wing-Mui Winnie, et al., 2016 Learning about the types of plastic wastes: Effectiveness of inquiry learning strategies. *Education 3-13* [interaktyvus]. **44**(3), 311-324. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/03004279.2014.976239>
- University of Michigan*. [žiūrėta 2017-12-16 d.]. Prieiga per: <http://www.umich.edu/~elements/fogler&gurmen/html/07chap/html/polymerization.pdf>
- VAITKEVIČIUS, Vitoldas; ŠERELIS, Evaldas ir KERŠEVIČIUS, Vidas., 2018 Effect of ultrasonic activation on early hydration process in 3D concrete printing technology. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. **169**, 354-363. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.007>
- VERMA, S. S., 2008 Roads from plastic waste. *The Indian concrete journal* [interaktyvus]. **3**(1), 43-44. [žiūrėta 2018-12-15 d.]. Prieiga per: https://icjonline.com/views/pov_s.s.verma.pdf