

**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Inžinerijos katedra

Edgaras Slušnys

**ANTRINIŲ ŽALIAVŲ  
PANAUDOJIMO BETONO  
GAMINIŲ GAMYBOJE TYRIMAS**

Gamybos inžinerijos studijų programos  
magistro baigiamasis darbas

Klaipėda, 2016

## SANTRAUKA

Slušnys E. Antrinių žaliavų panaudojimo betono gaminių gamyboje tyrimas. Gamybos inžinerijos studijų programos magistro baigiamasis darbas. Darbo vadovė Prof. dr. Janutėnienė J., Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2016. 52 p.

*Raktažodžiai:* betonas, užpildas, stipris gniuždant, PET, polistirenas, stiklo plastikas, gumos granulės.

Magistro baigiamajame darbe nagrinėjama antrinių žaliavų panaudojimo galimybės betono gaminių gamyboje ir betono su antrinių žaliavų priemėmis stiprumo savybės. Atlikta mokslinių darbų analizė, kurioje mokslininkai nagrinėja stiklo plastiko, PET, polistireno dalelių ir gumos granulės panaudojimo betone galimybes.

Eksperimentinėje dalyje pateikiama tyrimo metodika. Atlikti tyrimai su kubo formos (100 x 100 x 100 mm<sup>3</sup>) betono be užpildo ir betono su stiklo plastiko, PET, polistireno dalelių ir gumos granulės (3 mm ir 5 mm) užpildais stipriui gniuždant nustatyti.

Pateikti eksperimentinio tyrimo rezultatai parodė, kad naudojant dviejų skirtingų dydžių užpildų daleles galima panaudoti betono gamyboje. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados.

## SUMMARY

Slušnys E. The analysis of secondary raw material uses in the manufacture of concrete products. Processing Industry Engineering study Master's degree thesis. Supervisor Prof. dr. Janutėnienė J., University of Klaipėda: Klaipėda, 2016. 52 p.

Keywords: concrete, aggregate, compressive strength, PET, polystyrene, glass fibre, tire-rubber particle.

In Master thesis, it is analysed opportunities to use different recycled materials in producing products from concrete and analysed strength features when using these materials together. Research of scientific works was made where scientist analyse opportunities to use glass plastic, PET, polyester and rubber in producing concrete materials.

In a research, part on thesis methodology of this research is showed. Research was made with concrete cube (100 x 100 x 100 mm<sup>3</sup>) to test it strength on its own and same test with concrete cube filled and mixed with glass plastic, PET, polyester and rubber (3 mm and 5 mm).

Results of the tests shows that two different size fillings could be used in producing

concrete. Results are presented at the end of this thesis.

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Poveikis stiklo plastiko atliekų miltelių ant gniuždomojo stiprio betono ( $N/mm^2$ ) pagal įvairias kietėjimo sąlygas (P. Asokan et al. 2009) .....	10
2 lentelė. Lenkimo ir gniuždymo rezultatai (Garcia D. et al. 2014).....	13
3 lentelė. Bandinių rezultatai (Casanova-del-Angel, F ir Vazquez-Ruiz, J. L. 2012) .....	17
4 lentelė. Betono stiprio gniuždant ir tempiant rezultatai (Frigione M, 2010).....	18
5 lentelė. Kubų ir cilindrų gniuždymo stipris po 28 parų (MPa) (Rahmani E. et al. 2013) .....	19
6 lentelė. EPS betono mišinio sudėtis (Shi W. ir kt. 2015).....	21
7 lentelė. Slankumo ir Vebe klasės .....	25
8 lentelė. Sutankinimo ir sklidumo klasės .....	25
9 lentelė. Normaliojo ir sunkiojo betono stiprio gniuždant klasės .....	26
10 lentelė. Lengvojo betono stiprio gniuždant klasės.....	26
11 lentelė. Bandinių dydžio įtakos koeficientas $\beta$ , skaičiuojant betono bandinių stiprį gniuždant (Gurskis V. 2008).....	27
12 lentelė. Mechaniniai perdirbimo būdai .....	28
13 lentelė. Gumos granulių charakteristikos .....	39
14 lentelė. PET dalelių charakteristikos .....	40
15 lentelė. Polistireno granulių charakteristikos.....	40
16 lentelė. Stiklo plastiko dalelių charakteristikos .....	41
17 lentelė. Dalelių dydžiai .....	42
18 lentelė. Betono mišinių su 3 % gumos granulių užpildu sudėtis $1m^3$ .....	42
19 lentelė. Betono mišinių su 3 % PET dalelių užpildu sudėtis $1m^3$ .....	42
20 lentelė. Betono mišinių su 3 % polistireno dalelių užpildu sudėtis $1m^3$ .....	42
21 lentelė. Betono mišinių su 3 % stiklo plastiko dalelių užpildu sudėtis $1m^3$ .....	42
22 lentelė. Betono mišinių su 5 % gumos granulių užpildu sudėtis $1m^3$ .....	43
23 lentelė. Betono mišinių su 5 % PET dalelių užpildu sudėtis $1m^3$ .....	43
24 lentelė. Betono mišinių su 5 % polistireno dalelių užpildu sudėtis $1m^3$ .....	43
25 lentelė. Betono mišinių su 5 % stiklo plastiko dalelių užpildu sudėtis $1m^3$ .....	43
26 lentelė. Gniuždomojo stiprio rezultatai su gumos granulėmis .....	44
27 lentelė. Gniuždomojo stiprio rezultatai su polistireno dalelėmis .....	44
28 lentelė. Gniuždomojo stiprio rezultatai su PET dalelėmis .....	45
29 lentelė. Gniuždomojo stiprio rezultatai su stiklo plastiko dalelėmis .....	45
30 lentelė. Stiprio gniuždant reikšmės, MPa .....	46

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Betono formavimas naudojant stiklo plastiko atliekų miltelius: a) vandenyje, b) krosnyje (P. Asokan et al. 2009).....	9
2 pav. Betono gniuždymas, stiklo plastiko atliekų miltelių poveikis procentais (P. Asokan et al. 2010).....	11
3 pav. Poveikis po betono gniuždymo su ir be stiklo plastiko atliekų miltelių kubais: a) be stiklo plastiko atliekų miltelių, b) su 5 % stiklo plastiko atliekų milteliais, ir c) 15 % stiklo plastiko atliekų milteliais (P. Asokan et al. 2010).....	11
4 pav. Betono tempimo skilimo, stiklo plastiko atliekų miltelių poveikis procentais (P. Asokan et al. 2010).....	12
5 pav. Cemento matricų stebėjimas SAM: a) mikro cementas su stiklo pluoštu iš traukinio aptako po dviejų velenų smulkinimo ir sijojimo, b) mikro betonas su stiklo pluoštu iš traukinio aptako po plaktukinio smulkinimo ir sijojimo (Garcia D. et al. 2014) .....	13
6 pav. BMGP bandinys 90x60x5 cm veikiamas ventiliatoriaus (Gavrilov, J ir Sivilevičiu, H, 2011) .....	14
7 pav. MTS 810 dinaminis įrenginys (Gavrilov, J ir Sivilevičiu, H, 2011).....	15
8 pav. BMGP bandiniai (5 x 5 x 25 cm <sup>3</sup> ) prieš po ir po bandymo lenkiant (Gavrilov, J. ir Sivilevičiu, H., 2011).....	15
9 pav. Vandens rezervuaras su kubo ir cilindro formos bandiniais (Rahmani E. ir kt. 2013) .....	19
10 pav. Stipris gniuždant cilindro bandinius (15 x 30 cm) po 28 parų (MPa) (Rahmani E. et al. 2013).....	20
11 pav. Vandens ir cemento santykio įtaka bandiniams (Shi W. ir kt. 2015).....	22
12 pav. Gniuždymo stiprio pokyčiai priklausomai nuo betono su EPS dalelėmis akytumo: a) smulkus užpildas su akytumu b) stambus užpildas su akytumu (Shi W. ir kt. 2015).....	22
13 pav. Stiklo plastiko smulkinimas ir frezavimas: a) stiklo plastiko nuopjovos, b) dviejų velenų smulkintuvas, c) plaktukinis smulkintuvas ir d) apdoroto stiklo plastiko pūkai (Garcia D. et al. 2014).....	27
14 pav. Miltelinis smulkintuvas.....	32
15 pav. Stiklo plastiko dalelių (PM) perdirbimo rezultatai, po mechaninio perdirbimo, naudojant CW ir FW susmulkintas daleles (Meira Castro A. C. ir kt. 2013).....	33
16 pav. Stiklo plastiko atliekos prieš malimą, smulkios frakcijos stiklo plastiko smulkinimo aparatas (SM2000) (Meira Castro A. C. ir kt. 2014) .....	34
17 pav. Smulkinimo produktų CW ir FW susmulkinimo pavyzdžiai (Meira Castro A. C. ir kt. 2014)	

.....	34
18 pav. Kubo formos bandinio dėžutė .....	35
19 pav. Stimelit, Beton 500, C25 markė.....	36
20 pav. Hidraulinė gniuždymo mašina Zwick/Roell Z3000.....	37
21 pav. Gumos granulių dydis: a) 3 mm b) 5 mm .....	39
22 pav. PET dalelių dydis: a) 3 mm b) 5 mm .....	40
23 pav. Polistireno dalelių dydis: a) 3 mm b) 5 mm.....	41
24 pav. Stiklo plastiko dalelių dydis: a) 3 mm b) 5 mm.....	41
25 pav. Betono be užpildo gniuždymo stiprio reikšmės, n = 3.....	45
26 Pav. Betono bandiniai su 3 mm dydžio užpildo dalelėmis. ....	46
27 Pav. Betono bandiniai su 5 mm dydžio užpildo dalelėmis. ....	47
29 pav. 100 x 100 x 100 mm kubo formos bandiniai su antrinių žaliavų užpildais .....	48

## TURINYS

ĮVADAS.....	8
I. MOKSLINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ.....	9
1.1. Grįžtamojo perdirbimo medžiagų panaudojimas betono gaminių gamyboje.....	9
1.1.1. Stiklo plastiko panaudojimo galimybės betono gaminių tyrimuose.....	9
1.1.2. Gumos granulių panaudojimo galimybės betono gaminių tyrimuose.....	14
1.1.3. PET dalelių panaudojimo galimybės betono gaminių tyrimuose.....	16
1.1.4. Polistireno dalelių panaudojimo galimybės betono gaminių tyrimuose.....	20
II. BETONO GAMINIŲ GAMYBOS TECHNOLOGIJA.....	23
2.1. Perdirbimo būdai.....	27
2.2. Stambių ir smulkių frakcijų smulkinimo įrenginiai.....	30
III. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI.....	35
3.1. Gniuždymo stiprio nustatymo metodika.....	35
3.2. Gniuždymo bandymo įrenginys.....	36
3.3. Gniuždymo stiprio nustatymas.....	38
3.4. Užpildų medžiagos.....	39
3.5. Eksperimentinių tyrimų eiga.....	42
IV. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI.....	44
IŠVADOS.....	49
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	50

## IVADAS

Kompozitinės medžiagos yra perspektyvios dėl savo išskirtinių savybių. Vieni labiausiai žinomų kompozitų, tai stiklo pluoštu armuoti plastikai (ASP), kai poliesterio derva yra sutvirtinamas stiklo pluoštas. Armuoto stiklo pluošto atliekos susikaučia kompozitų gamybos metu. Taip pat kompozitų dalys išmetamos lauk, kai pasibaigia aviacijos ir kosmoso, statybų konstrukcijų, automobilių bei traukinių lokomotyvų tarnavimo laikotarpis.

Tai pat viena iš viena iš naujausių naudotų padangų panaudojimo alternatyvų yra smulkintos padangos, kurios yra visiškai perdirbamos į gumos granules, jų mechaninės savybės paverčia jas vertinga žaliava. Jos pasižymi šiomis savybėmis: nėra toksiškos, biologiškai neįnaučios, jų forma, svoris, tamprumas ir plastiškumas leidžia jas naudoti sveikas, smulkintas, granuliuotas ar sumaltas. Plačiausiai perdirbtos padangos yra naudojamos statybinėse medžiagose, nes gamybai reikalinga smulki padangų gumos frakcija, apsaugo nuo pavojingų įtrūkimų ar skylinėjimų eksploatacijos metu. Taigi, galima sėkmingai pagaminti iš gumos granulių įvairiausių gaminių, tokiu būdu yra dalinai išsprendžia utilizavimo problema.

Esant didelei medžiagų rinkos vertei ir paklausai, plečiantis technologijoms visame pasaulyje, atsirado poreikis utilizuoti medžiagų atliekas. Šiuo metu siūloma atliekas apdoroti mechaniškai, jas smulkinant ar granuliuojant, po to gautus miltelius panaudojant naujų gaminių savybių gerinimui. Viena iš galimybių panaudoti grįžtamojo perdirbimo medžiagas betono gaminių gamyboje.

**Darbo tikslas** – ištirti antrinių žaliavų panaudojimo galimybes betono gaminių gamyboje ir nustatyti betono su antrinių žaliavų užpildais stiprumo savybes.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti mokslinę darbo analizę siekiant nustatyti antrinių žaliavų panaudojimo galimybes betono gaminių gamyboje.
2. Išanalizuoti betoninių gaminių gamybos principus.
3. Atlikti betono stiprio gniuždant su antrinių žaliavų užpildais eksperimentinius tyrimus.
4. Atlikti betono stiprio gniuždant eksperimentinių tyrimų rezultatų analizę ir suformuluoti išvadas.

## I. MOKSLINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ

### 1.1. Grįžtamojo perdirbimo medžiagų panaudojimas betono gaminių gamyboje

Kompozicine medžiaga vadiname dviejų ar daugiau chemiškai skirtingų medžiagų, tarp kurių yra ryškūs skiriamieji paviršiai, derinį. Kompozitai pasižymi unikaliomis savybėmis, kurios kiekybiškai ir kokybiškai skiriasi nuo kiekvieno iš jų sudarančių komponentų. Šie komponentai parenkami taip, kad jie optimaliai papildytų vieni kitus, suteikdami bendrai medžiagai geresnių arba visai naujų savybių (Timofojev T. 2007).

#### 1.1.1. Stiklo plastiko panaudojimo galimybės betono gaminių tyrimuose

Straipsnyje P. Asokan et al. (2009) aprašomas tyrimas, kai armuoto stiklo plastiko atliekos buvo perdirbtos į miltelius ir sumaišytas su betonu, siekiant pagaminti cemento kompozitą. Rezultatai parodė, kad vidutinis gniuždymo stipris į betono mišinius pridėjus nuo 5 – 50 % armuoto stiklo plastiko atliekų miltelių po vandenių apsauga svyravo nuo 37 N/mm<sup>2</sup> iki 19 N/mm<sup>2</sup>. Didinant stiklo plastiko atliekų miltelių koncentraciją gniuždymo stipris mažėjo. Tačiau padidinus apsaugos trukmę (nuo 14-180 dienų), gniuždymo stipris naudojant 5 % stiklo plastiko atliekų miltelius betono mišinyje, padidėjo iki 45,75 ± 0,69 N/mm<sup>2</sup>. Be to, betono su 50 % stiklo plastiko atliekų miltelių kiekiu, tankis sumažėjo apie 12 % lyginant su kontrole. Nustatytuose laiko režimuose 12 mm storio cemento kompozituose, kuriuose įdėta 5 % stiklo plastiko pluošto atliekų, lenkimo jėga 16,5 N/mm<sup>2</sup>. Šio darbo rezultatai padarė pradžią tolesniam armuoto stiklo plastiko pluošto atliekų perdirbimui ir panaudojimui įvairiose blokinių statybų konstrukcijose.

Betonas laikomas vandenyje ir krosnyje, pavaizduotas 1 pav., o gauti duomenys pateikti 1 lentelėje.



1 pav. Betono formavimas naudojant stiklo plastiko atliekų miltelius: a) vandenyje, b) krosnyje (P. Asokan et al. 2009)

1 lentelė. Poveikis stiklo plastiko atliekų miltelių ant gniuždomojo stiprio betono ( $N/mm^2$ ) pagal įvairias kietėjimo sąlygas (P. Asokan et al. 2009)

Eksp nr.	Stiklo plastiko milteliai %	Laikymas vandenyje ( $N/mm^2$ ) trijų bandymų vidurkis			Laikymas krosnyje ( $N/mm^2$ ) trijų bandymų vidurkis		
		14 parų	28 parų	180 parų	14 parų	28 parų	180 parų
1	0 %	43,61 ± 0,37	47,67 ± 0,69	46,23 ± 0,57	32,31 ± 0,60	34,37 ± 0,56	39,20 ± 0,67
2	5 %	32,40 ± 0,86	37,08 ± 0,77	45,74 ± 0,69	36,08 ± 0,15	37,90 ± 1,32	47,17 ± 0,64
3	15 %	27,95 ± 0,25	34,09 ± 0,90	44,38 ± 0,42	29,21 ± 0,48	35,11 ± 0,37	46,24 ± 0,57
4	30 %	22,40 ± 1,12	29,58 ± 1,66	30,82 ± 0,64	25,76 ± 0,39	30,62 ± 1,03	34,39 ± 0,23
5	50 %	14,13 ± 0,59	19,05 ± 0,88	21,31 ± 0,03	17,02 ± 0,10	21,61 ± 0,72	24,24 ± 0,38

Vidutinis betono gniuždymo stipris naudojant 5 % ir 15 % stiklo plastiko atliekų miltelių be priedų ir kietėjimu po vandenių 37  $N/mm^2$  ir 34  $N/mm^2$  atitinkamai.

Taikant 30 % ir 50 % stiklo plastiko atliekų milteliai betone buvo pasiektas 29,5  $N/mm^2$  ir 19  $N/mm^2$  stipris gniuždant atitinkamai.

Betono gniuždymo stiprio padidėjimas su stiklo plastiko atliekomis ir palankiausias gniuždant stipris buvo po 180 parų, 45,75  $N/mm^2$ .

Nustatytuose laiko režiuose statybinių plokščių 8mm ir 12mm lenkimo jėga atitinkamai buvo 8,8  $N/mm^2$  ir 16,5  $N/mm^2$ .

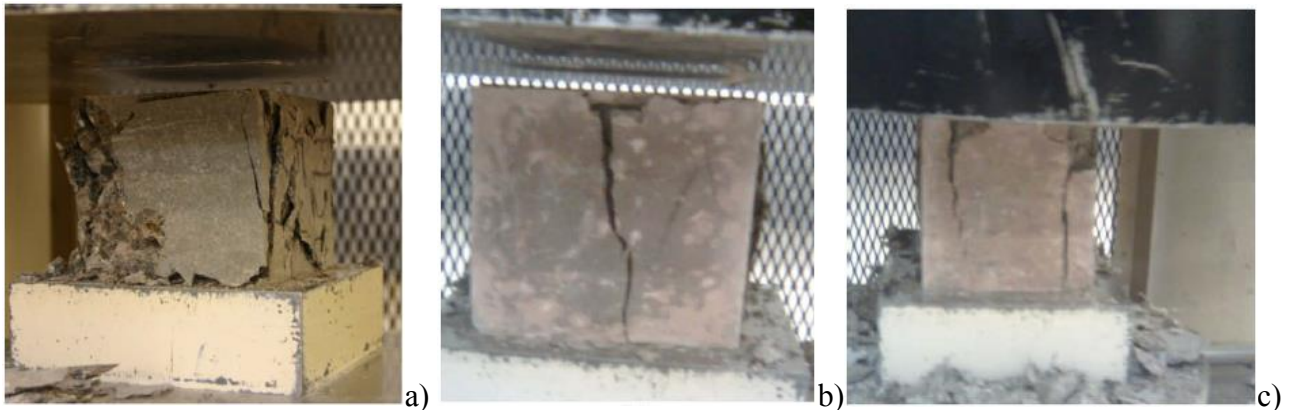
Norint gauti geriausias rezultatus su priemaišomis, tai galima naudoti minimaliai 5 % stiklo plastiko priemaišų ir laikyti šiltoje patalpoje (krosnyje) apie 180 parų. Tokiu būdu gaminio stipris bus didžiausias.

Straipsnyje (P. Asokan et al. 2009) atliekami eksperimentai gerinant mechanines savybes. T.y. maišant stiklo plastiko miltelius su cementu ir taip formuojamas betonas su stiklo plastiko priemaišomis. Eksperimentui tyrėjai pasidarė kubo formos gaminį. Betono kietėjimo laikas pasirinktas 28 paros. 2 pav. rodo betono gniuždymo rezultatus naudojant 0 %, 5 % ir 15 % stiklo plastiko priemaišų pagal vandens ir krosnies kietėjimo kontrolę. Į priemaišas taip pat yra pridėta 2 % superplastifikatoriaus.



2 pav. Betono gniuždymas, stiklo plastiko atliekų miltelių poveikis procentais (P. Asokan et al. 2010)

Pagal vandens kietėjimo kontrolę, be priemaišų betono stiprumą lėmė  $61,45 \pm 0,56 \text{ N/mm}^2$ . Su 5 % priemaišų betono stiprumą lėmė  $70,25 \pm 1,43 \text{ N/mm}^2$ . O su 15 % priemaišų betono stiprumą lėmė  $65,21 \pm 0,60 \text{ N/mm}^2$ . Pagal krosnies kietėjimo kontrolę, be priemaišų betono stiprumą lėmė  $54,80 \pm 0,58 \text{ N/mm}^2$ . Su 5 % priemaišų betono stiprumą lėmė  $66,17 \pm 0,76 \text{ N/mm}^2$ . O su 15 % priemaišų betono stiprumą lėmė  $59,77 \pm 0,60 \text{ N/mm}^2$ .

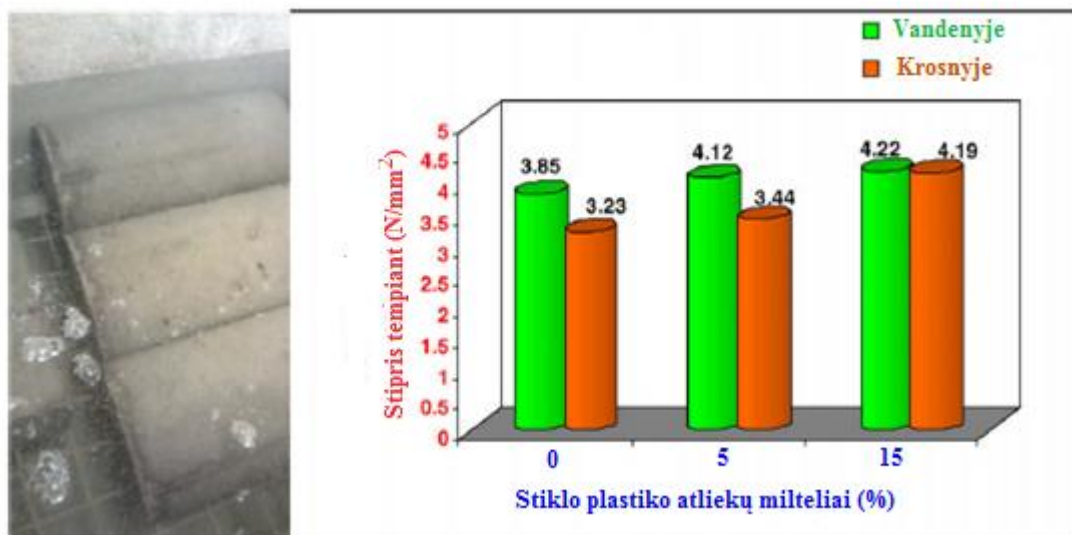


3 pav. Poveikis po betono gniuždymo su ir be stiklo plastiko atliekų miltelių kubais: a) be stiklo plastiko atliekų miltelių, b) su 5 % stiklo plastiko atliekų milteliais, ir c) 15 % stiklo plastiko atliekų milteliais (P. Asokan et al. 2010)

Šio tyrimo rezultatai parodė, kad yra galimybė pagerinti stiklo plastiko atliekų kokybę sumaišant su betonu ir perdirbti stiklo plastiko atliekas kaip potencialią statybinę medžiagą. Ir atliktas gniuždymo procesas, gniuždant betono kubus be priemaišų (a), su 5 % užpildytomis stiklo plastiko miltelių priemaišomis (b) ir su 15 % užpildytomis stiklo plastiko miltelių priemaišomis (c)

(3 pav.).

Kitam eksperimentui P. Asokan ir kt. pasidarė cilindro formos gaminį. Bandymui taip pat buvo pasirinktas 28 parų laiko tarpas. 4 pav. rodo betono tempimo stiprumo rezultatus naudojant 0 %, 5 % ir 15 % stiklo plastiko priemaišų pagal vandens ir krosnies kietėjimo kontrolę.

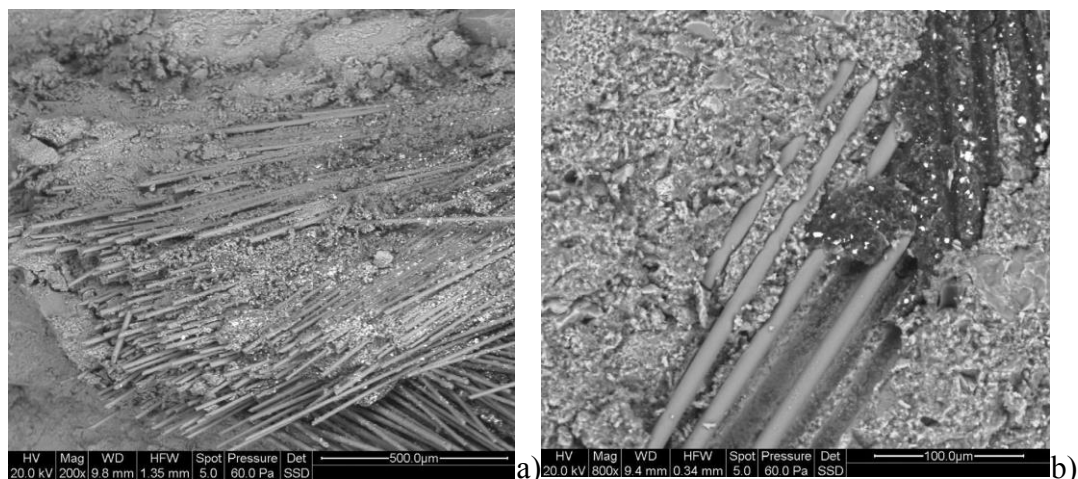


4 pav. Betono tempimo skilimo, stiklo plastiko atliekų miltelių poveikis procentais (P. Asokan et al. 2010)

Pagal vandens kietėjimo kontrolę, be priemaišų betono tempimo skilimo stiprumą lėmė  $3,85 \pm 0,069 \text{ N/mm}^2$ . Su 5 % priemaišų betono tempimo stiprumą lėmė  $4,12 \pm 0,087 \text{ N/mm}^2$ . O su 15 % priemaišų betono tempimo skilimo stiprumą lėmė  $4,22 \pm 0,020 \text{ N/mm}^2$ . Pagal krosnies kietėjimo kontrolę, be priemaišų betono tempimo skilimo stiprumą lėmė  $3,23 \pm 0,06 \text{ N/mm}^2$ . Su 5 % priemaišų betono tempimo skilimo stiprumą lėmė  $3,44 \pm 0,05 \text{ N/mm}^2$ . O su 15 % priemaišų betono tempimo skilimo stiprumą lėmė  $4,49 \pm 0,11 \text{ N/mm}^2$ .

Straipsnyje Garcia D. et al. 2014 tiria trumpus, mechaniškai apdorotus, iš įvairių šaltinių gautus armuoto stiklo pluošto plastikus, kurie yra tinkami mirko cemento dedamajai. Smulkinimo ir sijojimo procesai buvo pritaikyti, siekiant gauti norimą aukštos kokybės pluošto produktą, kurio ilgis būtų optimalus įkomponavimui tarp mikro cemento elementų.

Fizikinės - mechaninės betono savybės su apdorotu armuotu stiklo plastiko pluoštu buvo nustatytos gniuždymo ir lankstumo testais, taip pat tvirtumas ir šarmams bendra reakcija. Be to, sąveika tarp apdorotų armuotų stiklo pluošto pūkelių ir cemento matricų buvo stebima SAM (skenuojančiu elektriniu mikroskopu) (5 pav.).



5 pav. Cemento matricų stebėjimas SAM: a) mikro cementas su stiklo pluoštu iš traukinio aptako po dviejų velenų smulkinimo ir sijojimo, b) mikro betonas su stiklo pluoštu iš traukinio aptako po plaktukinio smulkinimo ir sijojimo (Garcia D. et al. 2014)

2 lentelėje yra pavaizduotos vidutinės stiprio vertės per 28 paras su atitinkamais standartiniais nuokrypiais.

Optimizuotas mechaninis procesas pagerina mechaninio lenkimo stiprį iki 16 %, o gniuždymo stipris padidėja iki 22 % su 1 % apdorotu armuoto stiklo pluoštu, lyginant su kontroliniu mikro cementu. Pridėjus 2 % apdoroto armuoto stiklo pluošto lenkimo ir gniuždymo stipris sumažėja 12 % ir 16,5 % atitinkamai, lyginant su 1 % pluoštu. Atsižvelgiant į tendencijas ir preliminariais tyrimų rezultatus, rodo, kad kuo didesnė pluošto procentinė dalis mikro cemente, tuo mechaninės mikro cemento savybės prastėja.

Atsižvelgiant į mėginių veiksmingumo sumažėjimus, geresnės mechaninės savybės buvo pastebėtos dėl to, kad didėjant apdirbtų pluoštų kiekiui, mišinyje didėja vandens poreikis.

2 lentelė. Lenkimo ir gniuždymo rezultatai (Garcia D. et al. 2014)

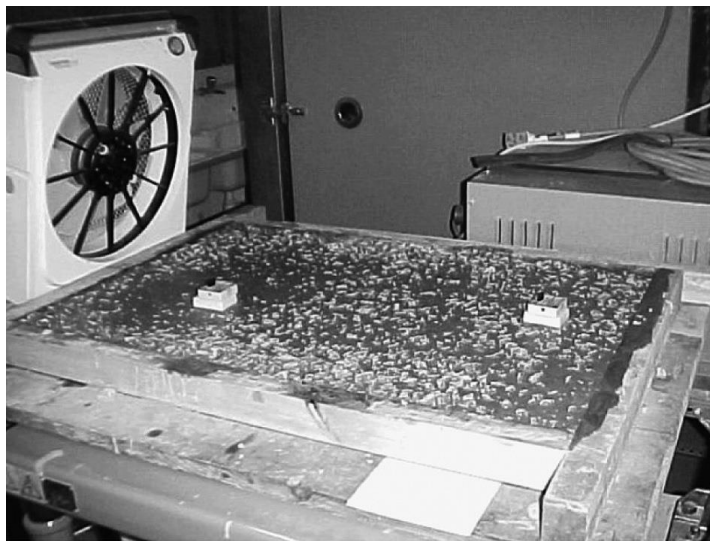
Cementas (kg/m <sup>3</sup> )	SFA (kg/3)	rGRP		v/c santykis	SP/c santykis	WRA/c santykis	Įtempiai (N/mm <sup>2</sup> )	
		(kg/m <sup>3</sup> )	(%)				Lenkimas	Gniuždymas
361	1703	0	0	0,5	1,0	0,8	8,91±0,23	50,82±1,78
361	1687	17	1	0,5	1,0	0,8	10,32±0,88	61,43±9,75
361	1653	34	2	0,5	1,0	0,8	9,20±0,13	52,68±1,19

Buvo nustatyta, kad, kai armuoto stiklo pluošto medžiaga, gauta iš optimizuoto smulkinimo proceso buvo naudojama paruošti mikro cementui, pavyzdžiui (40x40x160 mm<sup>3</sup>), lankstumas ir gniuždymo stipris per 28 paras padidėjo 16 % ir 22 %, atitinkamai, lyginant su kontroliniu bandiniu.

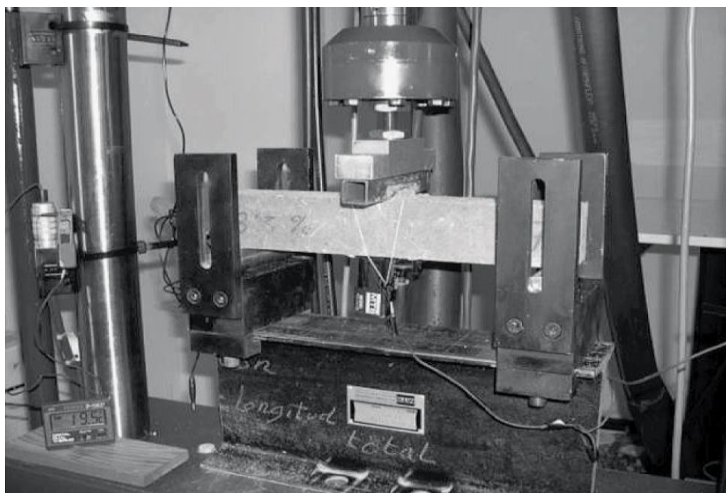
### 1.1.2. Gumos granulių panaudojimo galimybės betono gaminių tyrimuose

Žinant, jog perdirbta guma išlaiko geras dinamines ir statines charakteristikas. Todėl tyrimų metu buvo nustatyta, kad dalis naudojamo smėlio gali būti pakeistas į susmulkintas gumos granules gaminant gaminius iš betono (Kerševičius, Skripkiūnas 2001; Reda Taha et al. 2008).

Hernandez-Olivares et al. (2006) straipsnyje aprašomas atliktas tyrimas su prizmės formos bandiniais, kurių matmenys yra 90x60x5 cm (6 pav). Bandiniai buvo vienerius metus laikomi natūraliomis oro sąlygomis Madride, Ispanijoje. Pagal gautus tyrimo rezultatus atlikta analizė pagal teoriją apie plokščias plytas su elastiniu pagrindu pavadinimu „Westergaard“. „Westergaard“ teoriją buvo bandoma pritaikyti tyrimams, kuria būtų galima apskaičiuoti išpilto betono su modifikuota perdirbta guma (BMPG) važiuojamosios dalies storį. Kadangi kelio dangą yra veikiamas didelio automobilių srauto, todėl norint nustatyti jos patvarumą su BMPG, nustatyta, kad kelio dangą veiks 13 t apkrova ir  $10^6$  ciklų skaičius ir tai atitinka AASHTO standartus (American Association of State Highway and Transportation Officials 1993). Sijų bandymai buvo atliekami su MTS 810 hidrodinaminiu įrenginiu (7 pav).



6 pav. BMPG bandinys 90x60x5 cm veikiamas ventiliatoriaus (Gavrilov, J ir Sivilevičiu, H, 2011)



7 pav. MTS 810 dinaminis įrenginys (Gavrilov, J ir Sivilevičiu, H, 2011)

Trys atsparumo lenkimui bandymai buvo atlikti numatyta apkrova veikiant 10 Hz dažniui. Siekiant išvengti jėgos koncentracijos spaudimo vietose, buvo išpjauti ir uždėti trys metaliniai strypai iš tuščiavidurio metalo ( $2 \times 2 \text{ cm}^2$ , 2 mm storio) kurie uždedami ant bandinių taip, kaip pavaizduota 8 paveiksle. Šiam lenkimo tyrimui atlikti pasirinkta BMGP (betonas, modifikuotas perdirbta guma) su 3,5 % perdirbtos gumos koncentracija.



8 pav. BMGP bandiniai ( $5 \times 5 \times 25 \text{ cm}^3$ ) prieš po ir po bandymo lenkiant (Gavrilov, J. ir Sivilevičiu, H., 2011)

Pagal formulę (1), kai patikimumo intervalas 95 % atsparumas lenkimui  $10^6$  apkrovos ciklą yra 3,8 MPa, kai standartinio yra 3,9 MPa. Todėl galima teigti, kad ši reikšmė yra mažesnė (0,1 MPa) nei betono be gumos granulių.

$$\sigma_{stipr. lenk.,95} = -0,3 \text{Log}_{10}(N_{ciklai}) + 5,4 \text{ MPa} \quad (1)$$

čia  $N_{ciklai}$  – apkrovos ciklų skaičius.

Jungo modulis kelio dangai nustatomas pagal viršutinę ribą, kai patikimumo intervalas 95 %, kaip pateikta (2) formulėje:

$$E_{3,5; \text{ lenkimo},95} = 1,9 \text{Log}_{10}(N_{\text{ciklai}}) + 16,1 \text{ GPa} \quad (2)$$

Pagal gautus duomenis, tamprumo modulis po apkrovos ciklų pasiekė 27,4 GPa, kai standartinio – 25,1 GPa, o maksimali deformacija lenkiant bandinį nustatoma pagal (3) formulę (pagal žemutinę ribą su 95 % patikimumo intervalu) ir gauti duomenys po 10 ciklų apkrovos, lenkimo deformacija yra 146  $\mu\text{def}$ , o standartinio – 169  $\mu\text{def}$ .

$$E_{3,5; \text{ lenk},95\%} = -32,4 \text{Log}_{10}(N_{\text{ciklai}}) + 340,8 \quad (3)$$

Tai pat buvo atlikti bandymai su 5 % perdirbtu gumų granulėmis. Atsparumas lenkiant 3,0 MPa, deformacija lenkiant – 155  $\mu\text{def}$ , o tamprumo modulis 21,6 GPa.

Apibendrinama, jog naudojant 3,5 % perdirbtas gumos granules, siekiant atlaikyti 13 t ašies apkrovą, reikalingas 22 cm storio (20 cm be priemaišų) asfaltbetonis, o 5 % gumos koncentracija ši storį padidina iki 25 cm. Ir atlikus šiuos skaičiavimus ir palyginus perdirbtas gumos granules (3,5 %) su kontroliniu bandiniu be gumos priemaišų, galima teigti, kad su priemaišomis betono plokštės bandinys pastorėja 1 cm, tai rodo, kad reikalauja papildomų išlaidų ir prieštarauja tendencijai ploninti kelių dangos storį.

### 1.1.3. PET dalelių panaudojimo galimybės betono gaminių tyrimuose

PET yra polimeras naudojamas perdirbti nealkoholinių gėrimų tarai su pakankamu taros tvirtumu. PET yra medžiaga, paprastai naudojama inžinierių kaip statybinį elementą ne kaip užpildą. Geriausiai yra taikomas mažam cemento kiekiui, iki 300 kg/m<sup>3</sup>. Lengvojo betono tamprumo modulis yra mažesnis nei paprastojo betono. Naudojant PET užpildą, tūrinio svoris yra mažesnis 68,88 % nei su įprastais užpildais, t.y. smėliu, žvyru. Mažesnės deformacijos yra lengvojo betono nei paprastojo.

F. Casanova-del-Angel ir J. L. Vazquez-Ruiz (2012) straipsnyje aprašomas tyrimas, kai natūralus upės smėlis buvo naudojamas abiejų betono tipų gamybai, kurie buvo pagaminti be PET užpildo ir su PET užpildu. Remiantis standartu ACI-211.1-89 betono gamybai mišinys buvo naudojamas taip: I nustatytas vandens kiekis, II apskaičiuotas vandens ir cemento santykis, tam kad būtų galima nustatyti kiekvieno maišymo metu kokio kiekio sąnaudų reikės. Tiksliau 150 kg/cm<sup>2</sup>, 200 kg/cm<sup>2</sup>, 250 kg/cm<sup>2</sup> ir 300 kg/cm<sup>2</sup>, III nustatytas stambaus PET kiekis ir IV nustatytas smulkaus smėlio kiekis abejoms betono rūšims.

Mišiniai buvo sugeneruoti su koeficientu vadinamu taip: betonas be užpildo, CN-150, CN-

200, CN-250, ir CN-300 kg/cm<sup>2</sup> ir kiti buvo pagaminti naudojant PET užpildą atitinkamai CL-150, CL-200, CL250, ir CL-300 kg/cm<sup>2</sup>. Vandens, cemento, smėlio ir PET santykis pateikiamas 3 lentelėje.

3 lentelė. Bandinių rezultatai (Casanova-del-Angel, F ir Vazquez-Ruiz, J. L. 2012)

Užpildas (kg/cm <sup>2</sup> )	CN-150	CN-200	CN-250	CN-300	CL-150	CL-200	CL-250	CL-300
Vanduo (kg/cm <sup>3</sup> )	205	205	205	205	225	225	225	225
Cementas (kg/cm <sup>3</sup> )	310	350	390	450	281	321	365	409
Vandens/cemento santykis	1,3	1,01	0,82	0,47	0,8	0,7	0,62	0,55
Žvyras/PET (kg/m <sup>2</sup> )	1000	1000	1000	1000	133	133	133	133
Gniuždymo stipris (kg/cm <sup>2</sup> ) po 7 parų	145,70	116,70	192,30	218,20	143,50	160,57	193,14	250,18
Gniuždymo stipris (kg/cm <sup>2</sup> ) po 14 parų	149,30	145,08	199,25	252,25	147,41	158,38	214,84	247,97
Gniuždymo stipris (kg/cm <sup>2</sup> ) po 28 parų	149,90	188,20	243,30	306,86	147,38	185,16	231,20	297,08

Taip pat M. Frigione (2010) straipsnyje rašoma apie smulkaus neplauto PET užpildo panaudojimą gaminant betoną. Bandiniui atlikti buvo pagaminti šeši kubai (150 mm dydžio), trys cilindrai (aukštis 300 mm, skersmuo 150 mm). Kubų gniuždymo stipris matuojamas po 28 ir po 365 parų, o cilindrų tempimo stipris matuojamas po 28 parų. Visi bandiniai suglaudinti naudojant vibracinį stalą.

Po liejimo, bandiniai uždengiami šlapių skuduru ir paliekami patalpoje, kurioje kambario temperatūra yra  $20 \pm 1$  C° ir 95 % drėgmingumas. Po 24 valandų visi bandiniai išardomi ir sudedami į vandenį kietėjimui iki kol bus atliekami gniuždymo ir tempimo stiprio bandymai. Stipris gniuždant nustatomas pagal ASTM C 39 standartą, o stipris tempiant pagal ASTM C 496.

Gniuždymo stiprio rezultatai po 28 ir 365 parų yra pateikti 4 lentelėje. Rezultatai lentelėje yra pateikti iš trijų bandinių, iš kurių kiekvieno bandymo rezultatas nuo vidurkio skiriasi ne daugiau kaip  $\pm 0,3$  MPa. Tačiau, visi rezultatai aiškiai parodo nedideli betono stiprio sumažėjimą, kai sudėtyje yra WPET ir bandiniai laikomi 28 paras. Rezultatai po 365 parų lyginant su gniuždytais bandiniais po 28 parų, yra geresni. Bandinių rezultatai pateikti pagal standartą EN 12350-3:2009. Betono mišinio bandymai. 3 dalis. Vebe bandymas.

4 lentelė. Betono stiprio gniuždant ir tempiant rezultatai (Frigione M, 2010)

Mišinys	Vebe tinkamumas, s	Stipris gniuždant po 28 parų, MPa	Stipris gniuždant po 365 parų MPa	Stipris tempiant po 28 parų MPa
A – be PET	60	68,0	74,1	6,1
B – be PET	15	41,5	49,0	4,2
C – be PET	35	70,0	78,0	6,3
A – su PET	62	67,5	73,1	6,0
B – su PET	15	40,7	48,2	4,1
C – su PET	37	69,7	77,7	6,3

Betono mišinio standumo (Vebe) markės yra tokios:

- V0\* - kai tankinimo trukmė > 31 s;
- V1 - kai tankinimo trukmė nuo 30 iki 21 s;
- V2 - kai tankinimo trukmė nuo 20 iki 11 s;
- V3 - kai tankinimo trukmė nuo 10 iki 6 s;
- V4 - kai tankinimo trukmė nuo 5,0 iki 3,0 s.

\*rekomenduojamos standumo ribos < 30 s ir > 3,0 s (Malakauskas M ir Malakauskas K. 2009)

Į betono bandinius su raidėmis A ir B, įdėta 300 kg/m<sup>3</sup> cemento, o į C raide pažymėtą bandinį įdėta 400 kg/m<sup>3</sup> cemento. Bandiniuose su raidėmis A ir C vandens santykis su smėliu siekia 0,45, o su raide B – 0,55.

Nagrinėjant stiprį tempiant ir atsižvelgus jau anksčiau minėtus gautus stiprio gniuždant rezultatus, kad iš trijų bandinių, kurių kiekvieno bandymo rezultatas nuo vidurkio skiriasi ne daugiau kaip  $\pm 0,3$  MPa, tai apie stiprį tempiant rašoma, kad nuo vidurkio skiriasi tik  $\pm 0,02$  MPa. Pagal gautus duomenis galima teigti, kad naudojant tiek smėlio, tiek WPET užpildus gauti rezultatai yra identiški.

Rahmani E. et al. (2013) aprašo betoninių kubų ir cilindrų su PET dalelėmis gniuždymo stiprio tyrimo duomenis. Vandens ir cemento santykiai pasirinkti tokie: 0,42 ir 0,54. Kubo formos bandiniai pasirinkti su 5, 10, 15 ir 20 cm briaunų ilgiais, o cilindrų formų dydžiai – 10 x 20 ir 15 x 30 cm pateikiami 6 lentelėje. Bandiniai patalpinti vandens rezervuarą (9 pav.), kuriame vandens temperatūra siekia 20 °C laikomi 28 paras.



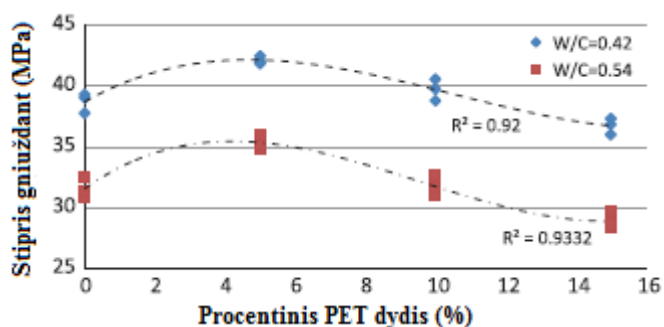
9 pav. Vandens rezervuaras su kubo ir cilindro formos bandiniais (Rahmani E. ir kt. 2013)

Pagal pateiktus duomenis 5 lentelėje galima teigti, kad su mažiausiu PET dalelių kiekiu pagerina betono savybes gniuždant, lyginant kai betonas yra be priemaišų (vandens ir cemento santykis 0,42). Savybės pagerinamos su visų dydžių kubais. Kai kubo dydis yra 5 cm, tai už betoną be priemaišų buvo atsparesnis 0,1 MPa. Įmaišant 10 % ir 15 % PET dalelių į betoną, matome, kad betono atsparumas mažėja. Panaši situacija ir kai vandens ir cemento santykis yra 0,54. Su mažiausiu PET dalelių kiekiu, betonas yra stipresnis, nei be priemaišų. Įmaišant 10 ir daugiau procentų PET dalelių betono stipris gniuždant mažėja.

5 lentelė. Kubų ir cilindrų gniuždymo stipris po 28 parų (MPa) (Rahmani E. et al. 2013)

Vandens/cemento santykis	PET, %	Kubas 5 cm	Kubas 10 cm	Kubas 15 cm	Kubas 20 cm	Cilindras 10 x 20 cm	Cilindras 15 x 30 cm
0,42	0	55,40	54,49	52,20	-	42,12	38,71
	5	59,51	55,56	53,24	-	44,27	42,14
	10	55,50	52,55	50,52	-	41,94	39,71
	15	52,07	50,46	46,59	-	38,75	36,73
0,54	0	46,17	41,85	41,10	40,76	33,39	31,58
	5	49,80	48,01	44,76	42,17	37,55	35,36
	10	45,88	43,09	39,94	39,31	33,68	31,76
	15	42,09	41,57	38,52	37,42	29,57	28,91

Panaši situacija yra ir su cilindro formos bandiniais. Su vandens ir cemento santykiu 0,42, ir su 0,54, maišant 5 ir 10 % PET atliekų kiekį, betono savybės yra didesnės negu betonas be jokių priemaišų. Bandymų su cilindrais, kurių dydis siekia 15 x 30 cm, rezultatai pateikiami ir 10 paveiksle.



10 pav. Stipris gniuždant cilindro bandinius (15 x 30 cm) po 28 parų (MPa) (Rahmani E. et al. 2013)

#### 1.1.4. Polistireno dalelių panaudojimo galimybės betono gaminių tyrimuose

Straipsnyje Shi W. et al. (2015) atliekami tyrimai, siekiant išsiaiškinti modifikuoto betoninio polistireninio putplasčio (EPS) patvarumą po gniuždomojo stiprio ir dinaminės ciklinės apkrovos. Kadangi polistireninis putplastis (EPS) lengvas betonas turi energijos sugėrimo šilumos išsaugojimo charakteristikas, todėl jis yra naudojamas konkrečiose statybos pramonės šakose, tokiose kaip dangoraižių (aukštų pastatų) ar jūroje esančių platformų statybose. Tokie statiniai jūroje statomi iš EPS dėl to, nes neteršia aplinkos, nes EPS gamybai sunaudojama mažai energijos ir taip nepadarо žalos aplinkai.

EPS betonas buvo gaminamas dalinai pakeičiant dalį smėlio, žvyro užpildus betone. Priklausomai nuo tankio ir stiprumo reikalavimų atitinkamai į mišinį maišomi užpildai. Santyki tarp stiprio ir įvairių tankių, EPS betonas gaunamas keičiant mišinio tūrį EPS dalelėmis (Y. Xu et al. 2012, K. Miled et al. 2007, R. Le Roy et al. 2005, C. Bagon and S. Frondistou-Yannas, 1976, R. Sri Ravindrarajah and A. J. Tuck, 1994, G. C. Hoff, 1971). Taip pat keletas mokslininkų tyrė susmulkinto skirtingų dydžių polistireno dalelių įtaką betono gniuždymo stipriui (A. Laukaitis et al., 2005, E. Parant and R. Le Roy, 2005). EPS betonas su susmulkintu polistirenu buvo naudojamas kaip energija sugerianti medžiaga skirta apsaugoti karinės paskirties pastatus nuo smūgių, todėl jis turi būti tvirtas ir ilgaamžiškas. Hernandez-Zaragoza J. B. (2013) tyrė akytojo betono plytas kurios gaunamos naudojant lengvą skiedinį su perdirbtu akytojo polistireno užpildu, pakeisdamas smėlį. Nustačius bloko savybes (absorbcijos, stiprį gniuždant ir įtempius) buvo pastebėta, kad šios plytos atitinka Meksiko standartų reikalavimus. Gauta medžiaga yra lengvesnė nei komercinės. Tokios plytos pagreitina rengimą, transportavimą, kokybę bei yra ekonomiškesnės, bet sunkiau apsaugomas sienų skilinėjimas dėl dirvožemio poslinkių. Geriausia kokybė išgaunama naudojant sausą polistireną (Hernandez-Zaragoza J. B. et al. 2013).

Tyrimuose buvo naudojamos šios medžiagos:

- cementas. CEM I 52.5 cementas;

- smulkus užpildas. Upės smėlis, kurio užapvalinimo modulis 2,85.;
- stambus užpildas. Žvyras, kurio diametras nuo 4 iki 20 mm.;
- EPS dalelės. EPS dalelės yra polistireno rutuliukai, kurių skersmuo nuo 1 iki 3 mm ir tankis 20 kg/m<sup>3</sup>, kuris parodytas 00 pav.;
- superplastifikatorius, polimerinė emulsija, hidroksipropilceliuliozė;
- vandens ir cemento santykis (v/c 32 %);

Maišymo metodas. Kad išsimašytų betone tolygiai EPS dalelės, maišoma beriant priemaišas palaipsniui. Visų pirma išmaišomas trečdalis vandens, pusė suskystinto polimero (maišoma apie minutę). Išmaišius beriamas žvyras ir galų gale įmaišomi likę užpildai tokie kaip: smėlis, superplastifikatoriu ir t.t. Visa tai turi užtikrinti tinkamą EPS betono gamybą.

6 lentelė. EPS betono mišinio sudėtis (Shi W. ir kt. 2015)

EPS santykis %	V/C santykis %	Cementas kg/m <sup>3</sup>	Smėlis kg/m <sup>3</sup>	Žvyras kg/m <sup>3</sup>	Vanduo kg/m <sup>3</sup>	Silicio garai kg/m <sup>3</sup>	Superplastifikatorius kg/m <sup>3</sup>	Polimerinė emulsija kg/m <sup>3</sup>	Hidroksipropilceliuliozė kg/m <sup>3</sup>
0	32	538	542	1152	172	26,90	8,07	8,07	2,69
0,2	32	430	434	922	138	21,54	6,45	6,45	2,15
0,2	32	538	542	662	172	26,90	8,07	8,07	2,69
0,3	32	375	380	808	120	18,75	5,63	5,63	1,88
0,3	32	538	542	662	172	26,90	8,07	8,07	2,69
0,4	32	323	325	691	103	16,14	4,84	4,84	1,61
0,4	32	538	542	172	172	26,90	8,07	8,07	2,69

Eksperimento atlikimui tyrėjai pasirinko betono bandinius - kubus (100 x 100 x 100) mm, kurie buvo naudojami gniuždymo stipriui matuoti. Bandiniai palikti kietėti 28 paras. Kaip teigia Shi. W. ir kiti, atsparumą gniuždymui žymiai sumažina vandens ir cemento santykis, kai jis siekia 0,36, kaip pateikta 11 paveiksle. Taip pat šiek tiek keičiasi esant vandens ir cemento santykiui 0,32 - 0,34, bet straipsnyje pateikiama su 0,32 vandens ir cemento santykiu.

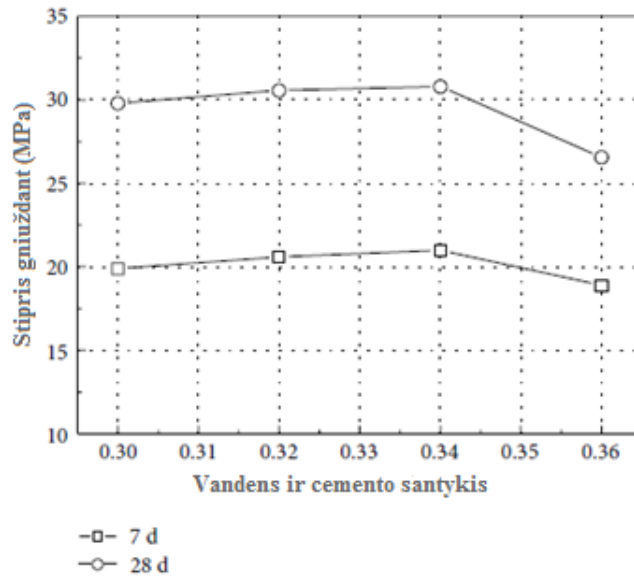
Siekiant laikytis reikalavimų pateikiama 6 lentelė su EPS betono mišinių sudėtimi, o EPS tūrio santykio  $\delta$ , betono akytumas nustatomas pagal formulę (4):

$$\delta = \frac{\delta_{matrica} - \delta_{betonas}}{\delta_{matrica} - \delta_{EPS}} \quad (4)$$

Čia:  $\delta_{matrica}$  – matricos tankis

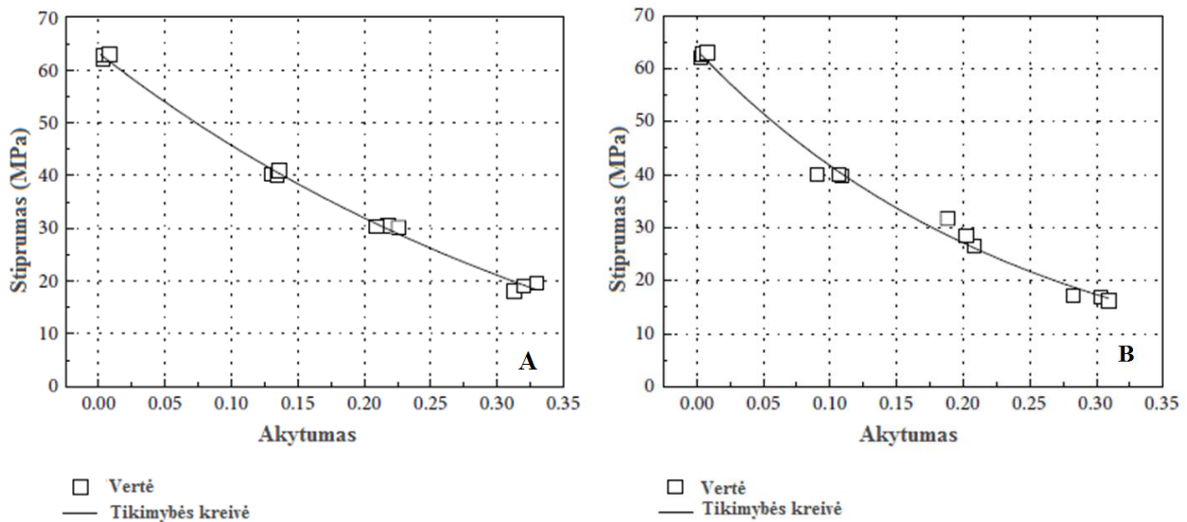
$\delta_{betonas}$  – betono tankis

$\delta_{\text{EPS}}$  – EPS tankis



11 pav. Vandens ir cemento santykio įtaka bandiniams (Shi W. ir kt. 2015)

Mažiausias ir didžiausias stipris gniuždant betoną po 28 parų siekė nuo 18,05 iki 40,31 Mpa, kai į betoną įmaišyta EPS dalelių, o tuo tarpu mažiausias ir didžiausias stipris gniuždant betoną su stambiu užpildu siekia nuo 16,23 iki 40,07 MPa, kaip pateikta 12a ir 12b paveiksluose.



12 pav. Gniuždymo stiprio pokyčiai priklausomai nuo betono su EPS dalelėmis akytumo: a) smulkus užpildas su akytumu b) stambus užpildas su akytumu (Shi W. ir kt. 2015)

Apibendrinant, galima teigti, kad EPS betonas turi mažo tankio privalumą, šilumos izoliaciją ir atsparumą seisminiams judėjimams. Todėl tai yra svarbi konstrukcinė medžiaga ir gali pakeisti dalį įprastines medžiagas, tokias kaip smėlis, žvyras. Mechaninės betono su EPS dalelėmis savybės (stipris gniuždant), jo tankis priklauso ne tik nuo dalelių kiekio ar dydžio bet ir nuo mišinio vandens su cemento santykiu.

## II. BETONO GAMINIŲ GAMYBOS TECHNOLOGIJA

Betonas yra ilgaamžiška ir tviri medžiaga. Tačiau dažnai pasitaiko sunkiai paaiškinami eksploatuojamų betono ir gelžbetonio konstrukcijų suirimo ir dėl to įvykstančių avarių atvejai: suyra gelžbetoninės užtvankos, tuneliai, tiltai, viadukai, aikščių grindinys, pastatų pamatai ir sienos bei perdengimai. Betonas suyra dėl betono gamybai panaudotų netinkamų medžiagų, kurios sukelia betono šarminę koroziją, technologinių pažeidimų ir dėl klimato poveikio, išryškinančio nepakankamą atsparumą šalčiui ir cheminiams poveikiams. Eksploatacijos metu betono ir gelžbetonio konstrukcijas veikia įvairūs fizikiniai–mechaniniai ir fizikiniai–cheminiai veiksniai. Ypatingai aktyviai betoną ardo cheminė agresyvi aplinka, dėl kurios kinta betono struktūra ir jo savybės, mažėja betono stipris. Betono atsparumas agresyvios aplinkos poveikiams lemia iš jo pagamintų konstrukcijų ilgaamžiškumą. (Vektaris B. ir Vilkas V. 2006)

Visų konstrukcijų įrengimas turi būti atliekamas pagal techninių specifikacijų nurodymus ir reikalavimus. Betonavimo darbams naudojamas betonas turi atitikti EN 206-1:2000 standarto reikalavimus ir techninių specifikacijų reikalavimus. Betono mišinio sudėtis ir komponentai (cementas, užpildai ir kitos medžiagos) turi atitikti visas mišinio ir sukietėjusio betono savybes (plastiškumą, tankį, stiprį, ilgaamžiškumą, armatūros apsaugą nuo korozijos). Sudėtis turi būti tokia, kad mišinys nesisluoksniuotų, neatsiskirtų cementinis plienas. Turi būti naudojamas tik šviežias betonas. Pradėjęs stingti betonas ar skiedinys negali būti naudojami. Betono mišinio sudėtis turi būti tokia, kad jį sutankinus betono struktūra būtų tanki, t.y. sutankinus standartiniu būdu oro neturi būti daugiau kaip 3 %, kai užpildai stambesni negu 16 mm ir ne daugiau kaip 4 %, kai užpildai smulkesni negu 16 mm. Betono mišinio konsistencija turi būti tokia, kad jis gerai užpildytų formą, tarpus tarp armatūros, nesisluoksniuotų ir galėtų būti tinkamai sutankintas esamomis priemonėmis. Nesukietėjusio betono klojimas turi būti nustatomas pagal LST ISO 4109:1995. Betonas konstrukcijose turi būti suklotas taip, kad atitiktų visus techninėse specifikacijose išdėstytus reikalavimus. Bet kuriam konstrukcijų elementui betonuoti turi būti naudojami tokie klojiniai, kad kiekviena išbetonuota konstrukcija atitiktų jai keliamus kokybės reikalavimus, t.y. matmenų tikslumas ir betono paviršiaus kokybė (Techninė specifikacija).

Betonui gaminti kaip rišamoji medžiaga vartojamas portlandcementas ne žemesnės kaip 400 markės – tai reiškia, kad cemento bandinio stipris gniuždant po 28 parų kietėjimo turi būti 39,2 MPa. Jis turi būti užtikrintos kokybės, pristatomas uždaruose maišuose ar statinėse, apsaugančiose nuo atmosferos poveikio pervežimo metu. Kiekviena siunta gamintojo turi būti sertifikuota – turi turėti kokybės dokumentą. Jei cementas sandėliuojamas, turi būti įrengta tinkama pastogė, kad būtų apsauga nuo aplinkos poveikio. Pasenęs ar gendantis cementas negali būti naudojamas ir turi būti

pašalintas iš statybos vietos. Cemento tiekimas ir sandėliavimas be taros turi būti suderintas su Techninės priežiūros inžinieriumi. Rangovas turi būti atitinkamai pasiruošęs cemento sandėliavimui be taros (Techninė specifikacija).

Taip pat turi būti naudojami užpildai atitinkantys Lietuvos statybos standarto LST 1342:1994 reikalavimus. Užpildų kenksmingų priemaišų leistiną kiekį, smulkinimo laipsnį, pavyzdžių bandymus, užpildų rūšiavimą žiūrėti LST 1342:2002. Didžiausias užpildo dalelių skersmuo neturi viršyti:

- vieno ketvirtadalio mažiausio konstrukcijos matmens;
- atstumų tarp armatūros strypų minus 5 mm;
- 1.3 karto apsauginio betono sluoksnio storio

Bendruoju atveju užpildų tinkamumas nustatomas pagal:

- normaliųjų ir sunkiųjų užpildų – pagal EN 12620:2000;
- lengvųjų užpildų – pagal EN 13055-1:1997.

Pagal EN 1260:2000 žvyras gali būti naudojamas tik tokiam betonui, kurio stiprio gniuždant klasė  $\leq$  C12/15.

Betonui gaminti gali būti naudojami iš plovimo vandens arba iš betono mišinio gauti užpildai. Pridedamų regeneruotų užpildų neturi būti daugiau kaip 5 % viso užpildų kiekio. Kai šių užpildų yra daugiau negu 5 % viso kiekio, tai regeneruoti užpildai turi būti to paties tipo kaip ir pirminiai užpildai, suskirstyti į stambias ir smulkias frakcijas, ir turi atitikti EN 12620:2000 standartą (Techninė specifikacija).

Vanduo betono mišiniui ruošti ir betonui laistyti turi būti švarus, be žalingų, normalų betono kietėjimą stabdančių priemaišų (rūgščių, sulfatų, riebalų ir pan.). Jame gali būti ne daugiau kaip 5000 mg/l įvairių ištirpusių druskų, iš jų sulfatų – ne daugiau kaip 500 mg/l. Vanduo turi būti nerūgštus, t.y. jo pH – ne mažesnis kaip 4 ir ne didesnis kaip 12,5. Betonui geriausiai tinka geriamas vandentiekio ir švarus upių bei ežerų vanduo. Vandens ir pakartotinai naudojamo vandens tinkamumas betonui gaminti nustatomas pagal EN 1008:1997 (Techninė specifikacija).

Stipriui gniuždant nustatyti dažniausiai gaminami kubo formos bandiniai, kurių briauna yra 100, 150, 200 arba 300 mm ilgio, bei cilindrai, kurių skersmuo (d) 100, 150, 200 mm, o aukštis  $h = 2d$ . Bandinių dydis priklauso nuo užpildų stambumo. Mažiausias matmuo turi būti ne mažesnis už keturgubą betono mišinio stambiausių užpildo dalelių dydį (Gurskis V. 2008).

Formoje betono mišinys turi būti sutankinamas taip, kad jis neištekėtų, nesusisluoksniuotų ir kad kuo labiau atitiktų konstrukcijų tankinimo režimą ir mišinio tankinimo laipsnį. Betono mišiniai S1, S2, V0, V1, V2, F1 ir F2 tankinami ant vibracinio stalo, o S3, S4, V3, V4, F3 ir F4 – metaliniu strypu, po vieną dūrį į kiekvieną 1000 mm<sup>2</sup> (30x33 mm) plotelį. Forma užpildoma sluoksniais.

Vieno sluoksnio storis neturi būti didesnis nei 60 mm. Bandiniai formoje laikomi ne trumpiau kaip 16 val., bet ne ilgiau kaip 3 paras. Išimti iš formų bandiniai laikomi iki 28 parų, drėgnoje aplinkoje – kameroje, kurioje santykinis drėgnis ( $95\pm 5$ ) % arba vandenyje ( $20\pm 2$ )°C temperatūroje. Slankumo (EN 12350-2), Vebe (tankinimo trukmė), (EN 12350-3), sutankinimo, (EN 12350-4) ir sklidumo (EN 12350-5), klasės pateikiamos 7 ir 8 lentelėse (Gurskis V. 2008).

7 lentelė. Slankumo ir Vebe klasės

Klasė	Slankumas, mm	Klasė	Tankinimo (Vebe) trukmė, s
S1	nuo 10 iki 40	V0	$\geq 31$
S2	nuo 50 iki 90	V1	nuo 30 iki 21
S3	nuo 100 iki 150	V2	nuo 20 iki 11
S4	nuo 160 iki 210	V3	nuo 10 iki 6
S5	$\geq 220$	V4	Nuo 5 iki 3

8 lentelė. Sutankinimo ir sklidumo klasės

Klasė	Sutankinimo laipsnis	Klasė	Pasklidimo skersmuo, mm
C0	$\geq 1,46$	F1	$\leq 340$
C1	nuo 1,45 iki 1,26	F2	nuo 350 iki 410
C2	nuo 1,25 iki 1,11	F3	nuo 420 iki 480
C3	nuo 1,10 iki 1,04	F4	nuo 490 iki 550
		F5	nuo 560 iki 620
		F6	$\geq 630$

Išskirtinė betono savybė – didelis savybių svyravimas. Tai paaiškinama sudedamųjų dalių (smėlio, stambių užpildų, priedų ir netgi cemento) kokybės svyravimu, betono mišinio paruošimo, transportavimo, suklojimo (sutankinimo laipsnio, 8 lentelė) ir kietėjimo sąlygų nevienodumu. Taip atsiranda tos pačios klasės betono stiprio svyravimai. Kuo aukštesnė betono mišinio gamybos, betonavimo kultūra, tuo mažesni šie svyravimai.

Rodiklis, įvertinantis galimus betono kokybės svyravimus, vadinamas betono klase (žymima raide C). Kai bandinys klasifikuojamas pagal jo stiprį gniuždant, normalaus ir sunkiojo betono klasė nustatoma pagal 9 lentelę, o lengvojo betono – pagal 10 lentelę.  $F_{ck,cyl}$  (betono charakteristinis stipris gniuždant, kai bandomi cilindrai) yra 150 mm skersmens ir 300 mm aukščio cilindrų charakteristinis stipris po 28 parų ir  $f_{ck,cube}$  (betono charakteristinis stipris gniuždant, kai bandomi kubai) yra po 28 parų 150 m kubų charakteristinis stipris gniuždant.

9 lentelė. Normaliojo ir sunkiojo betono stiprio gniuždant klasės

Stiprio gniuždant klasė	Mažiausias charakteristinis cilindrinis stipris $f_{ck,cyl}$ , N/mm <sup>2</sup>	Mažiausias charakteristinis kubinis stipris $f_{ck,cube}$ , N/mm <sup>2</sup>
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/40	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

10 lentelė. Lengvojo betono stiprio gniuždant klasės

Stiprio gniuždant klasė	Mažiausias charakteristinis cilindrinis stipris $f_{ck,cyl}$ , N/mm <sup>2</sup>	Mažiausias charakteristinis kubinis stipris $f_{ck,cube}$ , N/mm <sup>2</sup>
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

Bandinio stipris gniuždant  $f_c$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_c = \beta \frac{F}{A}, \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Čia  $f_c$  – gniuždymo stipris (MPa)

$F$  – ardančioji gniuždymo jėga (N);

$A$  – bandinio gniuždymo plotas (mm<sup>2</sup>);

$\beta$  – koeficientas, įvertinantis bandinių dydį (11 lentelė) (Gurskis V. 2008).

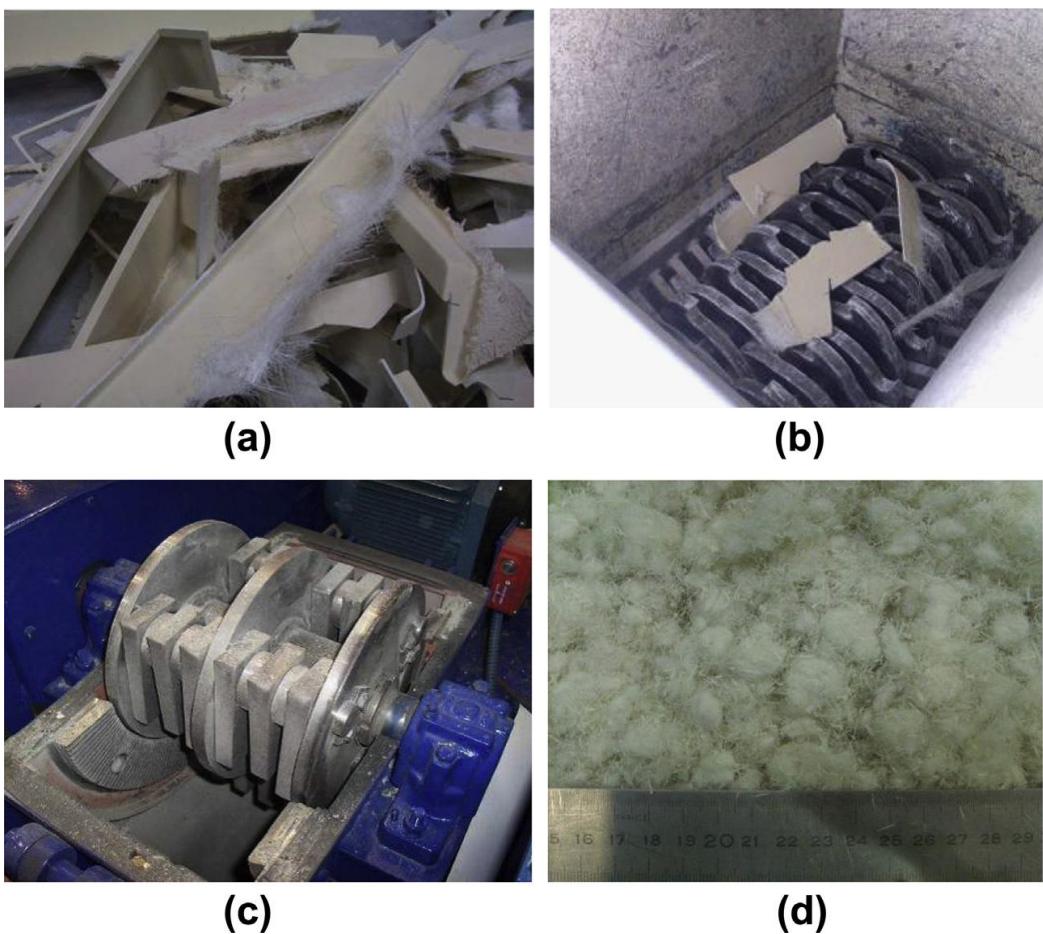
11 lentelė. Bandinių dydžio įtakos koeficientas  $\beta$ , skaičiuojant betono bandinių stiprį gniuždant (Gurskis V. 2008)

Kubo kraštinė mm	100	150	200	300
$\beta$	0,95	1,00	1,05	1,10

Gniuždymo stipris turi būti išreiškiamas 0,1 MPa tikslumu.

## 2.1. Perdirbimo būdai

**Mechaninis perdirbimas** – t.y. *smulkinimas* (13 pav.) (trynimas, pjaustymas, malimas), *rūšiavimas*, *presavimas-granuliavimas* (12 lentelė). Kai perdirbamos švarios ir vienarūšės plastikų gamybinės atliekos, tai jas panaudoti antrą kartą yra lengviau. Gautas susmulkintos dalelės dažniausiai maišomos su pirmine polimerine žaliava (iki 10 % plastiko atliekų), todėl gaminamos produkcijos rūšys gali likti tos pačios, o gauto plastiko dirbinių charakteristikos nesiskiria nuo tų, kaip ir gaminant iš pirminių žaliavų.



13 pav. Stiklo plastiko smulkinimas ir frezavimas: a) stiklo plastiko nuopjovos, b) dviejų velenų smulkintuvas, c) plaktukinis smulkintuvas ir d) apdoroto stiklo plastiko pūkai (Garcia D. et al. 2014)

Susmulkinus iki tinkamo dydžio, medžiaga yra sumalama ir išrūšiuojama į skirtingas frakcijas. Šis metodas yra ekonomiškai sudėtingas, nes yra sunku tinkamai pagaminti iš smulkiai sumaltos medžiagos, kai kaina yra panaši į šiuo metu naudojamus užpildus iš kalcio karbonato.

Dvi Jungtinės Karalystės kompanijos, gaminančios stogų dengimo produkciją (Filon ir Hambleside Danelaw) investavo į R ir D įmonę tam, kad išplėtoti GFRP malimo procesą. Filon siekė pagerinti energijos efektyvumą malimo procese, taip sumažinant kainą. O Hambleside Danelaw siekė maksimaliai padidindama perdirbimo vertę, išlaikydama pluošto ilgį.

Exeterio Universitetas išanalizavo stiklo pluoštą žemiausiame perdirbimo lygyje, kur jie buvo pateikę RECOMP projektą. Vieno pluošto stipris buvo sumažintas 20-30 %, nors **modulis** liko panašus, lyginant su pirmojo spaudimo pluoštu. Pluošto matricos obligacijų stipris buvo sumažintas maždaug 50 %. Šios vertės gali svyruoti dėl skirtingų malimo procesų (Job S. 2010).

12 lentelė. Mechaniniai perdirbimo būdai

<i>Būdas</i>	<i>Privalumai</i>	<i>Trūkumai</i>	<i>Apibūdinimas</i>
<i>Smulkinimas</i>	Smulkinant užima mažiau vietos. Galimybė sumaišyti su kitomis medžiagomis.	Reikalingas papildomas darbas smulkinant (rūšiavimas)	Siekama iš stambių atliekų gabalų gauti įvairaus smulkumo atliekų daleles.
<i>Rūšiavimas (mašinomis)</i>	Procesas greitesnis, mažiau imlus darbo jėgai.	Reikalingas atliekų paruošimas prieš rūšiuojant mechanškai, žemesnė kokybė, reikalinga speciali įranga, pagalbinės medžiagos, energija.	Procesas, kurio metu atliekos rūšiuojamos pagal medžiagas, iš kurių jos pagamintos. Mechaninis atliekų rūšiavimas (separacija) gali būti vykdomas prieš ir po atliekų smulkinimo. Mechaninis rūšiavimas skirstomas į: <ul style="list-style-type: none"> <li>• drėgną separaciją;</li> <li>• sausą separaciją.</li> </ul>

<i>Rūšiavimas (rankomis)</i>	Aukšta rūšiavimo proceso kokybė.	Sunki, lėta ir nenaši technologija <i>Reikalinga žmonių grupė.</i>	Paprasčiausias ir plačiausiai taikomas būdas
<i>Presavimas</i>	Mažos energijos sąnaudos perdirbimui.	Ribota gaminių forma.	Smulkiadispersinių perdirbamų atliekų dalelių (miltelių, pastų, lydinių) gaminamas rutulio, cilindro, stačiakampio formos produktas.

Taip pat yra naudojami ir tokie perdirbimo būdai:

***Cheminis perdirbimas*** - tai procesas, kurio metu naudojami įvairūs skaidymo būdai. Pvz.: hidrolizė, depolimerizacija. Hidrolizės, kurios metu polimeras yra skaidomas vandeniui. Polimerui reaguojant su vandeniu susidaro mažesnės molekulės, kurių viena prisijungia vandens vandenilio protoną H<sup>+</sup>, o kita OH<sup>-</sup> grupę. Depolimerizacijos metu polimerai skaidomi į mažos molekulinės masės junginius (monomeras). Monomerai vėl gali būti panaudoti polimerų gamybai, arba naujų kompozitų sintezei. Cheminio apdorojimo metu gauti kiti organiniai junginiai gali būti panaudojami chemijos pramonėje, pvz.: kuro gamybai.

***Terminis perdirbimas*** – dažniausiai naudojama *pirolizė*. Tai plastikų terminė destrukcija dažniausiai inertinėje bedeguonėje aplinkoje. Gali būti vykdoma vienos rūšies arba plastikų mišinio pirolizė. Susidarančių produktų struktūrą ir kiekius nulemia: 1) temperatūra ir slėgis bei 2) polimerų tipas. Paprastai susidaro 3 pirolizės produktų frakcijos:

- dujiniai produktai (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, plastikų monomerai, pvz. CH<sub>2</sub>=CH<sub>2</sub>);
- lakieji skysčiai (aromatiniai angliavandeniliai, parafinai);
- suodžiai - amorfinė elementinė C.

*Pirolizė* - tai terminis organinių medžiagų skaidymo būdas 400-600 °C temperatūros bedeguonėje aplinkoje. Šio proceso metu iš komunalinių atliekų, medienos, plastiko, padangų ar kitų medžiagų susidaro trijų skirtingų agregatinių būsenų produktai, pvz.: kietieji - suodžiai, skystieji - įvairios dervos, biokuras ir biodujos. Kokie produktai ir kokiais kiekiais susidarys skaidymo metu priklauso ne tik nuo organinių medžiagų sudėties, bet ir nuo pirolizės sąlygų - temperatūros ir slėgio.

*Dujifikacija* – tai kai dujinimo metu iš organinių medžiagų, jas kaitinant 1000 °C temperatūroje bedeguonėje aplinkoje, gaunamos sintetinės dujos, tokios kaip vandenilis, anglies monoksidas ar metanas. Šios dujos yra vertinga žaliava organinei sintezei, kurios metu galima pagaminti skystus biodegalus. Dujinimo procesas dažniausiai naudojamas panaudotų automobilinių tepalų ar sintetinių polimerinių medžiagų perdirbimui (Zhang S., Ramesh R. 2012).

## **2.2. Stambių ir smulkių frakcijų smulkinimo įrenginiai**

**Stambios frakcijos plastikų smulkintuvai** yra naudojami ypač didelių gabaritų plastinių medžiagų smulkinimui ir jie būna kelėtos tipų:

- EWS (vieno veleno smulkintuvai stambiai frakcijai);
- EWS-R (didelių pramoninių vamzdžių ir profilių smulkintuvai);
- HGM (ypač kietos ir turinčios daug priemaišų medžiagos smulkintuvai);
- HOS (1000 – 3000 mm diametro vamzdžių ir profilių smulkintuvai);
- HR (vieno veleno smulkintuvai lengvai frakcijai);
- SMR (didelių vamzdžių ir profilių smulkintuvai);

**Smulkios frakcijos plastikų smulkintuvai** yra naudojami mažų gabaritų plastinių medžiagų smulkinimui ir jie būna kelėtos tipų:

- SMS (smulkinti sudėtingomis sąlygomis);
- SML (lengvos, didelių gabaritų ar didelės apimties plastiko laužo, su plonos ar vidutinio storio sienelėmis, smulkinimui);
- SML - C (naudojamas gamybos įmonėse kur gamybos procese lieka plastiko broko, kurį galima smulkinti);
- SMP (vamzdžių ir profilių smulkinimui);
- SB (PET butelių, elektronikos įrengimų smulkinimui);
- HB (apjungia smulkios ir stambios frakcijos smulkinimą kartu su hidrauliniu padavimu);
- SMF (didelių sūkių ypač smulkios frakcijos (miltai) smulkintuvas įvairioms medžiagoms);

Smulkios frakcijos plastikų smulkintuvų analizė:

SMS serijos granulatoriai turi galingus peilius skirtus smulkinti sudėtingomis sąlygomis. Patogus ir greitas priėjimas prie smulkinimo zonos atliekant patikros, peilių ar sieto keitimo darbus. SMS smulkintuvų peilių kampas gali būti reguliuojamas atskirai nuo smulkintuvo, taip taupant laiką peilių keitimui. Smulkintuvo rotorius diametras nuo 220 iki 800 mm, o darbinis plotis 300-1450 mm. Variklių gama nuo 5,5 iki 160 kW.

**SML** bendrosios paskirties smulkintuvai pasižymi tvirtumu ir maža triukšmo emisija. Tai kompaktiškas, lengvai transportuojamas įrengimas. Lengvas ir patogus priėjimas prie smulkinimo zonos valymo, priežiūros ar remonto darbams atlikti. SML serijos smulkintuvai yra skirti lengvos, didelių gabaritų ar didelės apimties plastiko laužo, su plonos ar vidutinio storio sienelėmis, smulkinimui.

**SML – C** smulkintuvai yra kompaktiški ir ypač tylūs bendros paskirties smulkintuvai. Gali būti naudojamas gamybos įmonėse kur gamybos procese lieka plastiko broko, kurį galima smulkinti.

Visų tipų (SMS, SML, SML – C) smulkios frakcijos smulkintuvai pasižymi šiomis savybėmis:

- Tvirta konstrukcija;
- Apsaugoti ir išorėje sumontuoti guoliai;
- Reguliuojami peiliai garantuoja pastovų ir optimalų pjovimą;
- Kompaktiškas ir vietą taupantis dizainas;
- Galimybė peilius sureguliuoti dirbtuvėse, prieš peilių keitimą.

**SMP** modelių serijos įrengimams nereikalinga papildoma jėga stumti link rotorius. Ilgi profiliai paduodami horizontaliu rankiniu būdu, o smulkios detalės iš viršaus. Šio įrengimo esminis privalumas yra “chevron” peiliai, kurie žymiai padidina pralaidumą, lyginant su kitais standartiniais peiliais. Tai puikus įrengimas taupantis vietą, laiką ir pinigus.

**SB** smulkintuvams perdirbant PET butelius, tam pačiam kiekiui butelių susmulkinti SML 60/100 tipo smulkintuvo pagalba, reikalinga 90 kW galia, o naudojant SML 45/60 tipo smulkintuvą kartu su SB tipo medžiagų padavimo įrenginiu, reikalinga 45 kW galia. Šis puikus rezultatas pasiekiamas dėl SB tipo medžiagų padavimo įrenginio konstrukcijos. Horizontaliais sraigtais medžiaga tolygiai pasiekia smulkinimo zoną, gaunant maksimalų rezultatą. Gali smulkinti:

- Butelius (pvz. HDPE ir PET);
- Susmulkintus produktus (pvz. elektros ir elektronikos įrengimų atliekos);
- Smulkius produktus (pvz. PP dangteliai);

**HB** Specialios konstrukcijos ir didelių sūkių dėka, įrengimas geba smulkinti ryšulius, perpjautus plėvelės ritinius ir ypač didelius bei storasienius plastikus į smulkią frakciją, naudojant tik vieną įrengimą. HB tipo smulkintuvai yra visiškai automatinis, turintis didelį padavimo bunkerį.

**SMF** smulkintuvu smulkinimas vyksta tarp ypač greitai besisukančio rotorius ir statoriaus peilių, tarp kurių yra siauras tarpelis. Sieto pagalba reguliuojamas frakcijos dydis. Rotoriaus guoliai ypač tikslūs, sumontuoti išorėje ir apsaugoti nuo smulkinimo zonoje atsirandančių nešvarumų.

Tinkamo dydžio medžiaga transportuojama pneumatiniu būdu. Pneumatinis įtaisas taip pat turi šaldymo funkciją, kuri vėsina pjovimo zoną.

Esminis SMF tipo smulkintuvo privalumas - neizoliuotas rotorius. Tai leidžia pasiekti aukštą oro pralaidumą aušinant pjovimo zoną. Gauta medžiaga yra aukščiausios kokybės miltų pavidalo frakcija.

Didelių sūkių ypač smulkios frakcijos smulkintuvas skirtas įvairioms medžiagoms:

- Celiuliozei;
- Plastikiniams pluoštams;
- Gumai;
- Putplasčiui;

Naudojamas plėvelių gamyboje pagerinant tankio ir birumo savybes lyginant su granulėmis.

Pateikti SMF smulkintuvo privalumai:

- Iki 200000 pjūvių per minutę;
- Pneumatinis medžiagos išnešimas;
- Didelis našumas;
- Tvirtas ir kompaktiškas dizainas;

Taip pat plastiko atliekų smulkinimui yra naudojami milteliniai smulkintuvai (14 pav.), kurie yra sukurti smulkinti plastikus, gumą, popierių, tekstilę ir kitas medžiagas į ypač smulkią frakciją (dulkes). Priklausomai nuo įrengimo konfigūracijų pasiekiamas 0-1000  $\mu\text{m}$  ir 0-200  $\mu\text{m}$  galutinis produktas.



14 pav. Miltelinis smulkintuvas

Smulkios frakcijos bei milteliniai plastikų smulkintuvai yra dažniausiai naudojami laboratorijose, moksliniuose tyrimuose dėl savo darbinio pločio bei gaunamų mažų parametrų (miltelių) smulkintų atliekų. Susmulkintos stiklo plastiko dalelės vėliau gali būti panaudojamos kaip

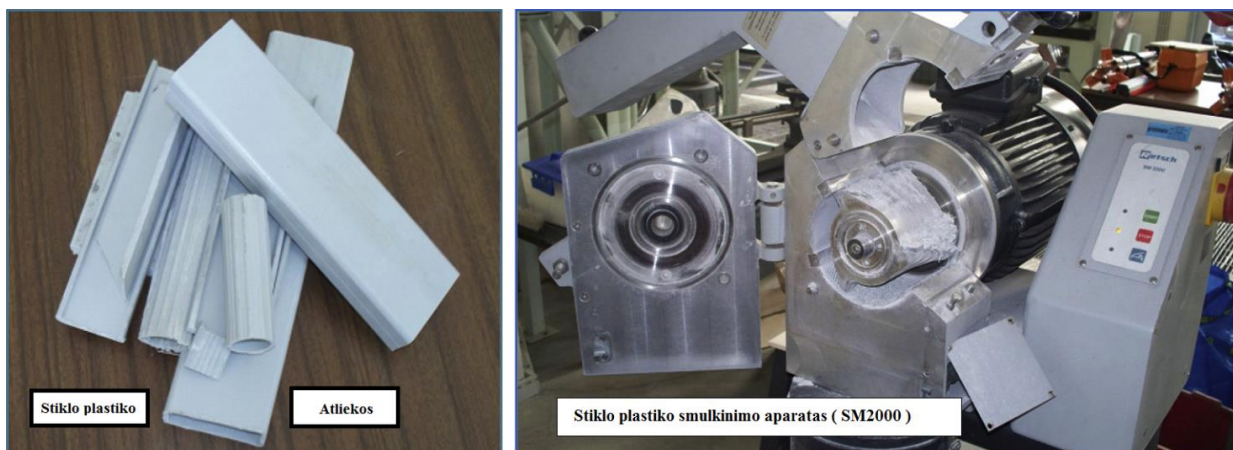
antrinės žaliavos, pvz.: betono fizikinių savybių gerinimui.

Straipsnyje Meira Castro A. C. et. al. (2013) aprašomas stiklo plastiko atliekų perdirbimo tyrimas. Tyrimui atlikti stiklo plastiko atliekos buvo tiekiamos iš vietinės kompozitinių medžiagų gamybos įmonės. Tai įvairios atraizos, likusios nuo statybose naudojamų kompozitų pjaustymo, smulkinimo. Turimos smulkios stiklo plastiko atraizos laboratorijoje dar kartą susmulkintos, naudojant smulkios frakcijos plastiko smulkintuvą (SM2000). Naudojant skirtingų porų dydžio sietus, smulkintuvo kameroje, gautos atitinkamai skirtingo susmulkinimo laipsnio stiklo plastiko dalelės - smulkūs lygūs milteliai (angl. fine - FW) ir šiurkštūs dalelių pluošteliai (angl. coarse - CW) pateikta 15 pav.



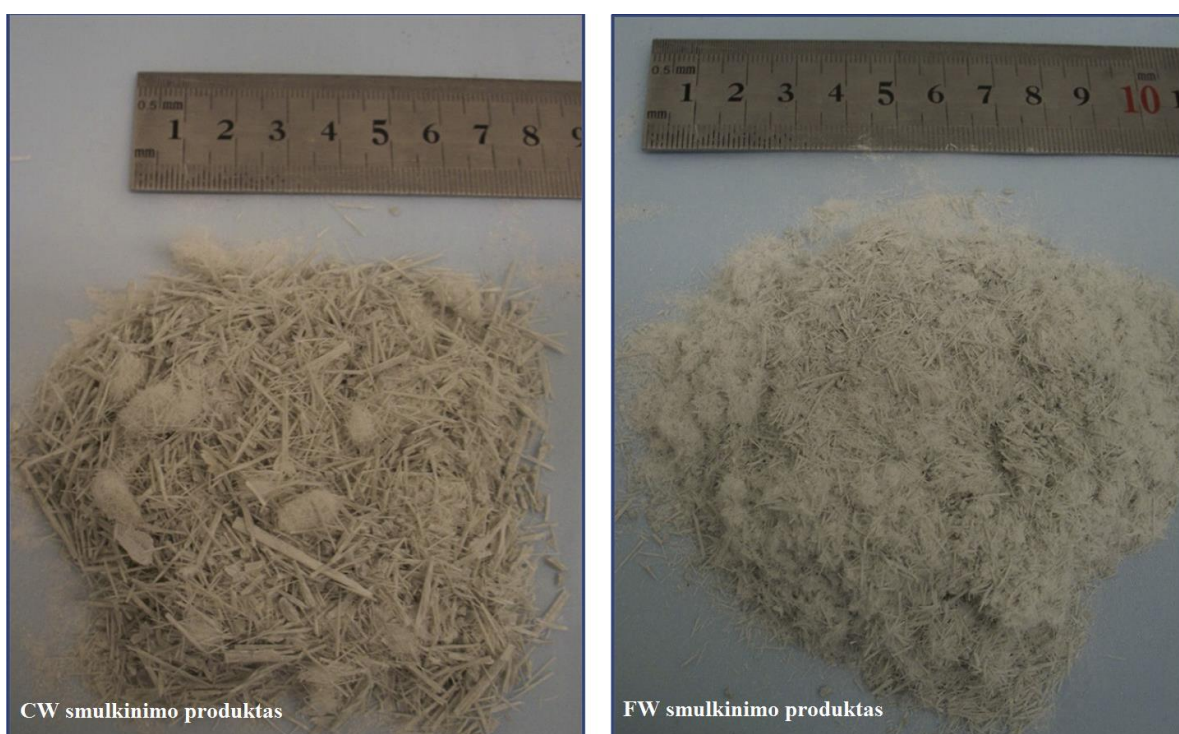
15 pav. Stiklo plastiko dalelių (PM) perdirbimo rezultatai, po mechaninio perdirbimo, naudojant CW ir FW susmulkintas daleles (Meira Castro A. C. ir kt. 2013)

Meira Castro A. C. et al. (2013) straipsnyje aprašoma stiklo plastiko kompozitinių atliekų perdirbimo technologija. Naudojant mechaninį perdirbimo būdą, stiklo plastiko atliekos smulkinamos smulkios frakcijos plastikų smulkintuvu SM2000 (16 pav.).



16 pav. Stiklo plastiko atliekos prieš malimą, smulkios frakcijos stiklo plastiko smulkinimo aparatas (SM2000) (Meira Castro A. C. ir kt. 2014)

Smulkinant atliekas naudojami 2,5 mm kvadratinių bei 1,5 mm trapecijos formos porų sietai, esantys šlifavimo kameros viduje. Stiklo plastiko atliekų susmulkinimo laipsnis priklauso nuo sietų porų dydžio. Susmulkinus atliekas gauti dviejų rūšių smulkinimo produktai (17 pav.), stambaus stiklo plastiko atliekų pluošteliai (CW), naudojant 2,5 mm sietus ir smulkaus stiklo plastiko atliekų milteliai (FW), naudojant 1,5 mm sietus.



17 pav. Smulkinimo produktų CW ir FW susmulkinimo pavyzdžiai (Meira Castro A. C. ir kt. 2014)

Mechaninis (smulkinimas, frezavimas, sutrupinimas) stiklo plastiko kompozitinių atliekų perdirbimo būdas yra ekonomiškai naudingas, bei atitinkantis aplinkosauginius reikalavimus, nes neteršia aplinkos, lyginant su cheminiu ar terminiu apdorojimu.

### III. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Eksperimentinio tyrimo tikslas – ištirti kokią įtaką betono gaminių stiprumui turi gumos, PET, polistireno ir stiklo plastiko užpildai. Vienas iš pagrindinių mechaninių bandymų betono gaminiams yra gniuždymo bandymas.

Tiriamąjį darbo metu, kaip tiriamasis objektas, buvo pasirinktas betonas su gumos, PET, stiklo plastiko ir polistireno užpildais. Taip pat buvo atliekami gniuždymo bandymai, siekiant ištirti betono stiprumą. Iš gautų duomenų atliekama betono gaminių savybių analizė.

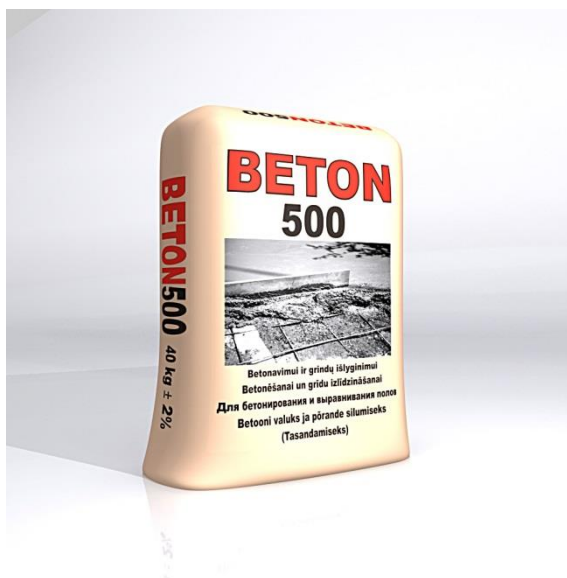
#### 3.1. Gniuždymo stiprio nustatymo metodika

Pagal LST EN 12390-3:2009 „Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris“ standartą bandinių geometriniai matmenys gali būti 100 mm arba 150 mm. Eksperimentui atlikti pasirinkta gaminti 100 mm aukščio tuščiavidurius kubo formos bandinius. Bandiniams atlikti naudojami kubo formos metalinės dėžutės (18 pav.). Šios formos daugkartinio naudojimo, jas išardant, išvalant ir sutepant iš naujo. Išardžius dėžutes lengvai galima išimti bandinį iš jų ir atlikti tolimesnius tyrimus. Bandymas atliekamas su hidrauline gniuždymo mašina (Zwick/Roell), kuri atitinka EN 12390-4 standartą.



18 pav. Kubo formos bandinio dėžutė

Eksperimentui skirtų bandinių gamybai naudojamas Stimelit firmos betonas (19 pav.). Tai smulkiagrūdis, sausasis, gniuždant C25 stiprio markės betonas (Beton 500). Armavimui naudojami gumos, PET, polistireno, stiklo plastiko (3 ir 5 mm frakcijų dydžiai) užpildai. Tam, kad bandiniai atitiktų standartus, tempiant, gniuždant ar kitais mechaniniais būdais bandant juos paveikti, privaloma bandinius išlaikyti 28 paras. Bandiniai laikomi patalpose, kurioje temperatūra 20 °C, bei santykinis drėgmingumas (95±5).



19 pav. Stimelit, Beton 500, C25 markė

Eksperimento bandinių gamybos etapai:

- bandinių formos parengimas;
- betono mišinio paruošimas;
- sijojamas ir užpildų išrūšiavimas;
- užpildų sumaišymas su cementu;
- bandinio išliejimas;
- bandinių laikymas 28 paras.

### 3.2. Gniuždymo bandymo įrenginys

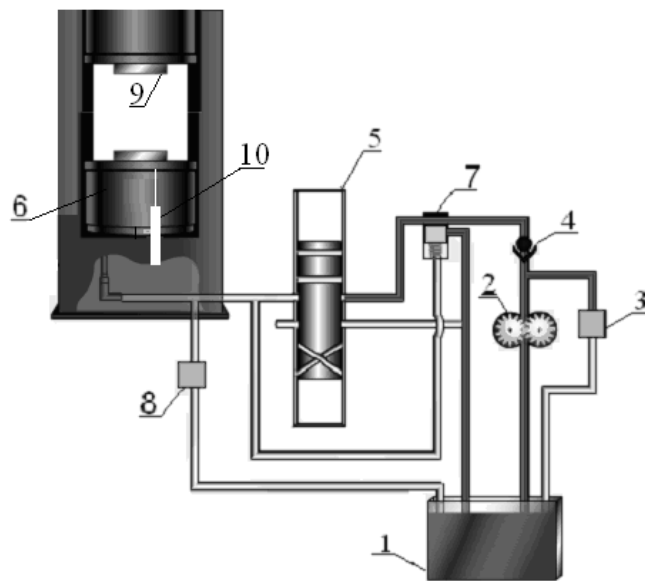
Bandinių tyrimai atliekami su hidrauline gniuždymo mašina (Zwick/Roell Z3000) (20 pav.). Medžiagų gniuždymo bandymai atliekami pagal standartą LST EN 12390-3:2009. Standartas: „Sukietėjusio betono bandymai. Bandinių gniuždymo stipris“. Bandiniai apkraunami iki suirimo gniuždymo bandymo mašina, atitinkancia EN 12390-4:2003 standartą. Užrašoma bandinio atlaikoma apkrova ir apskaičiuojamas gniuždymo stipris.

Bandinio paruošimas ir padėties reguliavimas. Švariai nušluostomi visi bandymo mašinos atraminiai paviršiai. Nuo bandinių paviršių, kurie liesis su plokštelėmis, pašalinami birūs grūdėliai arba pašalinės medžiagos. Tarp bandymo mašinos plokščių ir bandinio neįterpiami jokie tarpai, išskyrus pagalbines plokštes arba tarpo reguliavimo blokus. 100 x 100 x 100 mm kubo formos bandinys centruojamas apatinės plokštelės atžvilgiu 1 % tikslumu.

Pagrindinės staklių charakteristikos:

- didžiausia išvystoma jėga 3000 kN
- didžiausias bandinio aukštis 480mm;

- didžiausias plotis 450 mm;
- didžiausias ilgis 450 mm;
- jėgos celės skiriamoji geba 0,5 N;
- poslinkio skiriamoji geba 0,01 mm;
- darbo organų greitis 0 – 400 mm/min



20 pav. Hidraulinė gniuždymo mašina Zwick/Roell Z3000

**Įrangos veikimo principas.** Tepalo siurblys (2) iš tepalo rezervuaro (1) pumpuoja tepalą. Apsauginis vožtuvas (3) atsidaro esant per dideliam tepalo slėgiui. Pro paleidimo vožtuvą (4) tepalas patenka į sistemą. Vožtuvas (5) reguliuoja tepalo padavimą į darbinį cilindrą (6). Jį pakelia arba nuleidžia. Kai tepalas paduodamas į cilindrą, cilindro judanti dalis pradeda kilti - tai preso darbinė eiga. Tepalą išleidžiant pro gražinimo vožtuvą (8) atgal į tepalo rezervuarą, stūmoklis nuo rėmo svorio leidžiasi žemyn - tai tušti eiga. Vožtuvas (7) sumažina spaudimą judant cilindru. Kylant cilindru į viršų yra gniuždomas bandinys, pastatytas tarp kylančio cilindro (6) ir atraminio paviršiaus (9). Atraminis paviršius pritvirtintas prie jėgos celės, kurioje pagal atsirandančią deformaciją nustatoma jėga ( $F$ ), kuria gniuždomas bandinys (elektrinio tenzometro principu). Ekstensiometras (10) matuoja cilindro poslinkį ( $\Delta l$ ).

Ijungiamas presas ir gniuždymo jėga didinama taip, kad bandinyje atsirandantys gniuždymo įtempimai didėtų ( $0,6 \pm 0,2$ ) MPa per sekundę. Po pradinio apkrovimo, kuris neviršija apytiksliai 30 % ardomosios apkrovos, apkrova bandiniui perduodama be smūgių ir nepertraukiamai didinama parinktu pastoviu  $\pm 10$  % greičiu tol, kol nustoja didėti.

### 3.3. Gniuždymo stiprio nustatymas

Gniuždymo stiprumo riba, kuriai veikiant bandinys suyra. Gniuždomojo stiprumo riba apskaičiuojama taip:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5)$$

čia:  $f_c$  - gniuždymo stipris (MPa);

$F$  – didžiausia ardomoji apkrova (N);

$A_c$  – bandinio skerspjūvio plotas kvadratiniais milimetrais ( $\text{mm}^2$ ), kurį veikia gniuždymo jėga;

Sukietėjusio betono bandinių gniuždymo stipris nustatomas pagal LST EN 12390-3:2009 standartą.

Bandiniui pasiekus ardomąją reikšmę, jis pradeda deformuotis. Tuomet apkrova nebedidinama ir bandiniui leidžiama suirti. Baigus bandymą, kompiuterio ekrane gaunamos diagramos ir jose stiprumo jėgos skaitinės reikšmės. Gniuždymo diagramose gaunamos stiprumo ribos. Tuomet apskaičiuojamas bandymo rezultatų aritmetinis vidurkis.

Norint nustatyti bandinių ilgalaikiškumą, galima įvertinti tik tuo atveju, jei yra žinomi jos patikimumo rodikliai. Atlikus eksperimentą ir gavus tam tikras rezultatų skaitines reikšmes, reikalinga jas aprašyti. Tyrimo rezultatams apdorojimui reikalingi šie statistiniai rodikliai: aritmetinis vidurkis, dispersija, vidutinis kvadratinis nuokrypis ir variacijos koeficientas. Statistiniai rodikliai apskaičiuojami pagal standartines formules (Martinėnas 2004):

1. Aritmetinis vidurkis  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

2. Dispersija  $\delta^2$ :

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (7)$$

3. Vidutinis kvadratinis nuokrypis arba standartas  $\delta$ :

$$\delta = \sqrt{\delta^2} \quad (8)$$

4. Variacijos koeficientas  $v$ :

$$v = \frac{\delta}{\bar{x}} 100\% \quad (9)$$

Jei variacijos koeficientas  $v \leq 5 - 10 \%$ , tai laikoma, kad rezultatų sklaida nedidelė;  $15 - 20 \%$  – didelė;  $v \geq 20 \%$  – labai didelė.

### 3.4. Užpildų medžiagos

#### Tyrimui naudojamos medžiagos:

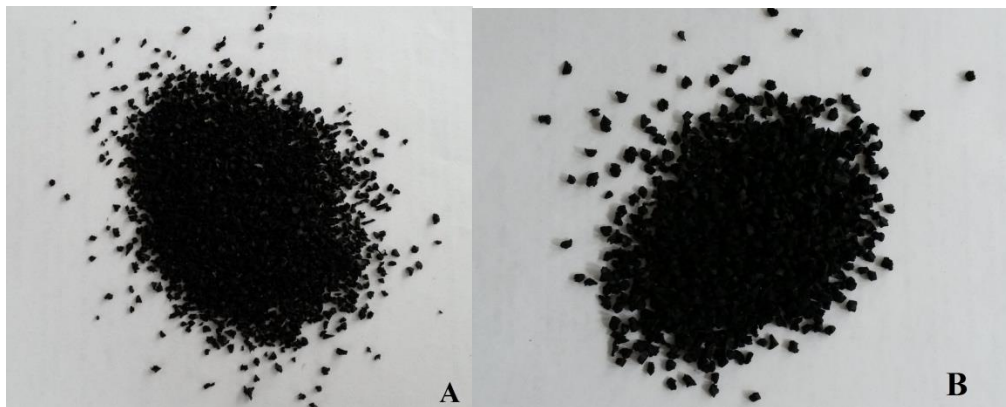
1. gumos granulės, PET, polistireno, stiklo plastiko dalelės;
2. betono mišinys;
3. vanduo.

#### Guma

Eksperimentui atlikti naudojamos perdirbtos smulkintos padangų gumos granulės, pagamintos UAB „Metaloidas“. Dalelių granulimetrinė sudėties dydžiai: 3 mm (21a pav.), 5 mm (21b pav.). Padangų dalelių charakteristikos yra apibendrintos 13 lentelėje.

13 lentelė. Gumos granuliu charakteristikos

1.	Tankis	1,16 g/cm <sup>3</sup>
2.	Pelenų kiekis	5 %
3.	Suodžiai	29 %
4.	Polimeras	50 %
5.	Plastifikatorius	10 %
6.	Drėgmė	8-12 %



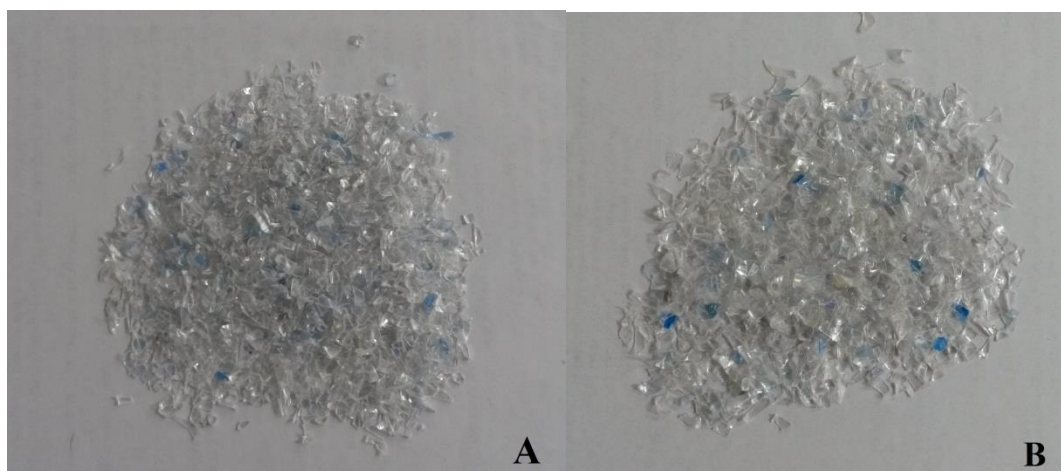
21 pav. Gumos granuliu dydis: a) 3 mm b) 5 mm

#### PET

Eksperimentui atlikti naudojamos perdirbtos smulkintos PET dalelės, gautos iš UAB „Retal Baltic“. Dalelių granulimetrinė sudėties dydžiai: 3 mm (22a pav.), 5 mm (22b pav.). PET dalelių charakteristikos yra apibendrintos 14 lentelėje.

14 lentelė. PET dalelių charakteristikos

1.	Tankis	0,35 g/cm <sup>3</sup>
2.	Lydimosi temperatūra	242-255 °C
3.	Klampa	0,75 dl/g
4.	Soda, druskos	20 ppm
5.	Drėgmė	0,5 %



22 pav. PET dalelių dydis: a) 3 mm b) 5 mm

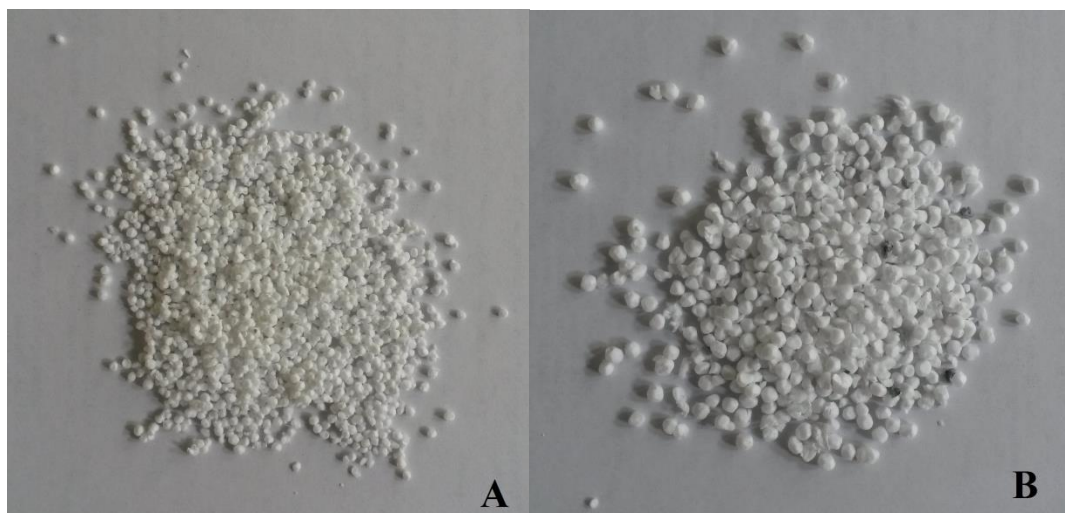
### Polistirenas

Eksperimentui atlikti naudojamos perdirbtos smulkintos PET dalelės, gautos iš UAB „Pirklio baldai“. Dalelių granulimetrinė sudėties dydžiai: 3 mm (23a pav.), 5 mm (23b pav.). PET dalelių charakteristikos yra apibendrintos 15 lentelėje.

Polistirenas atitinka Europos šalių standartus LST EN 13163, todėl jis gali būti vartojamas ir kitose Europos sąjungos šalyse.

15 lentelė. Polistireno granulių charakteristikos

1.	Tankis	0.96–1.04 g/cm <sup>3</sup>
2.	Lydimosi temperatūra	240 °C



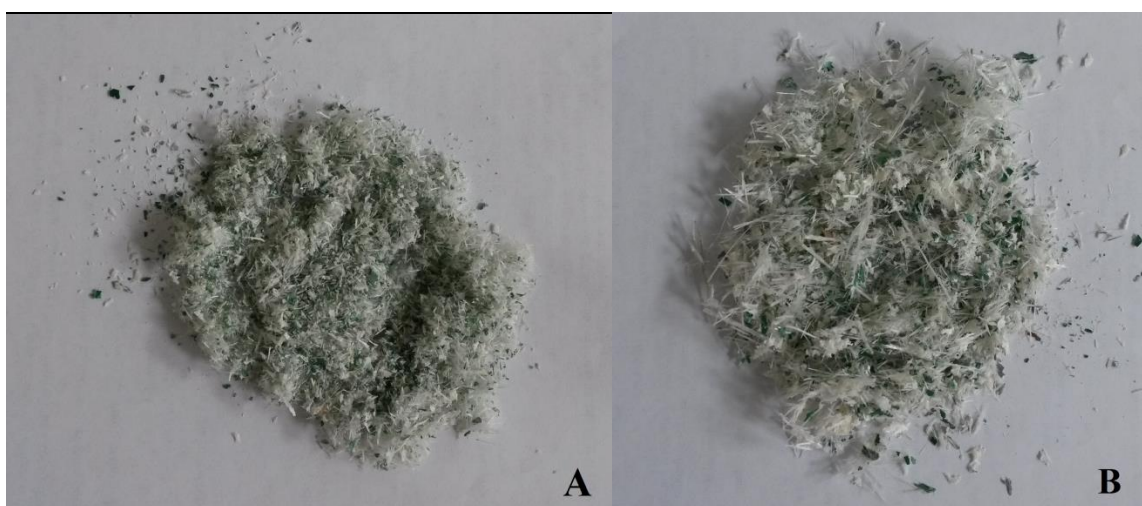
23 pav. Polistireno dalelių dydis: a) 3 mm b) 5 mm

### Stiklo plastikas

Eksperimentui atlikti naudojamos susmulkintas stiklo plastikas, gautas iš UAB „Palangos komunalinis ūkis“. Dalelių granulimetrinė sudėties dydžiai: 3 mm (24a pav.), 5 mm (24b pav.). Stiklo plastiko dalelių charakteristikos yra apibendrintos 16 lentelėje.

16 lentelė. Stiklo plastiko dalelių charakteristikos

1.	Tankis	1,16 g/cm <sup>3</sup>
2.	Lydymosi temperatūra	240 °C



24 pav. Stiklo plastiko dalelių dydis: a) 3 mm b) 5 mm

### 3.5. Eksperimentinių tyrimų eiga

Betono bandinių sudėtis su skirtingų dydžių dalelių užpildais pateikti 17 lentelėje. Bandinys Nr. 1 pagamintas be jokių priemaišų.

Likę bandiniai pagaminti užpildžius dalį tūrio su polistireno, PET, stiklo plastiko dalelėmis ir gumos granulėmis, kurių dydis 3 mm ir 5 mm.

17 lentelė. Dalelių dydžiai

Bandinio Nr.	Užpildo dalelių dydis, mm
Nr. 1	Be užpildo
Nr. 2	3 mm
Nr. 3	5 mm

Bandiniai gaminami laboratorijoje rankiniu būdu. Kiekvienas bandinys sudarytas iš 97 % arba 95 % cemento su vandens santykiu ir 3 % arba 5 % atitinkamu užpildu. Po tris skirtingus bandinius dedami skirtingo dydžio užpildai. Duomenys pateikiami 18 - 25 lentelėse.

18 lentelė. Betono mišinių su 3 % gumos granuliu užpildu sudėtis 1m<sup>3</sup>

Bandinio Nr.	Bandinio mišinys, kg	Gumos granulės, kg	Vandens kiekis, ml
Nr. 1 Betono mišinys be užpildo	6,055	-	606
Nr. 2 Betono mišinys su gumos granulėmis 3 mm	6,401	0,052503	640
Nr. 3 Betono mišinys su gumos granulėmis 5 mm	6,401	0,0525203	640

19 lentelė. Betono mišinių su 3 % PET dalelių užpildu sudėtis 1m<sup>3</sup>

Bandinio Nr.	Bandinio mišinys, kg	PET dalelės, kg	Vandens kiekis, ml
Nr. 1 Betono mišinys su PET dalelėmis 3 mm	6,401	0,043956	640
Nr. 2 Betono mišinys su PET dalelėmis 5 mm	6,401	0,040293	640

20 lentelė. Betono mišinių su 3 % polistireno dalelių užpildu sudėtis 1m<sup>3</sup>

Bandinio Nr.	Bandinio mišinys, kg	PET dalelės, kg	Vandens kiekis, ml
Nr. 1 Betono mišinys su polistireno dalelėmis 3 mm	6,401	0,001221	640
Nr. 2 Betono mišinys su polistireno dalelėmis 5 mm	6,401	0,001221	640

21 lentelė. Betono mišinių su 3 % stiklo plastiko dalelių užpildu sudėtis 1m<sup>3</sup>

Bandinio Nr.	Bandinio mišinys, kg	PET dalelės, kg	Vandens kiekis, ml
Nr. 1 Betono mišinys su stiklo plastiko dalelėmis 3 mm	6,401	0,013431	640
Nr. 2 Betono mišinys su stiklo plastiko dalelėmis 5 mm	6,401	0,009768	640

22 lentelė. Betono mišinių su 5 % gumos granuliu užpildu sudėtis 1m<sup>3</sup>

<b>Bandinio Nr.</b>	<b>Bandinio mišinys, kg</b>	<b>Gumos granulės, kg</b>	<b>Vandens kiekis, ml</b>
Nr. 1 Betono mišinys su gumos granulėmis 3 mm	6,401	0,0875	640
Nr. 2 Betono mišinys su gumos granulėmis 5 mm	6,401	0,0875	640

23 lentelė. Betono mišinių su 5 % PET dalelių užpildu sudėtis 1m<sup>3</sup>

<b>Bandinio Nr.</b>	<b>Bandinio mišinys, kg</b>	<b>PET dalelės, kg</b>	<b>Vandens kiekis, ml</b>
Nr. 1 Betono mišinys su PET dalelėmis 3 mm	6,401	0,07326	640
Nr. 2 Betono mišinys su PET dalelėmis 5 mm	6,401	0,067155	640

24 lentelė. Betono mišinių su 5 % polistireno dalelių užpildu sudėtis 1m<sup>3</sup>

<b>Bandinio Nr.</b>	<b>Bandinio mišinys, kg</b>	<b>PET dalelės, kg</b>	<b>Vandens kiekis, ml</b>
Nr. 1 Betono mišinys su polistireno dalelėmis 3 mm	6,401	0,002035	640
Nr. 2 Betono mišinys su polistireno dalelėmis 5 mm	6,401	0,002035	640

25 lentelė. Betono mišinių su 5 % stiklo plastiko dalelių užpildu sudėtis 1m<sup>3</sup>

<b>Bandinio Nr.</b>	<b>Bandinio mišinys, kg</b>	<b>PET dalelės, kg</b>	<b>Vandens kiekis, ml</b>
Nr. 1 Betono mišinys su stiklo plastiko dalelėmis 3 mm	6,401	0,022385	640
Nr. 2 Betono mišinys su stiklo plastiko dalelėmis 5 mm	6,401	0,01628	640

Suformavus kubo formos bandinius (100 x 100 x 100 mm), formose būtina išlaikyti bent 16 val. ir ne ilgiau 3 parų. Bandiniai iš formų ištraukti praėjus 66 valandoms. Toliau laikomi dar 25 paras (iš viso 28 paras) patalpoje, kurioje santykinis drėgmingumas (95±5). Pasibaigus laikymo terminui, bandiniai džiovinami ir vėliau atliekamas betono gniuždymo stiprio bandymas, kuris nustatomas pagal LST EN 12390-3:2009 standartą.

#### IV. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

Eksperimentinio tyrimo metu buvo atliktas betono gaminių gniuždymas. Tam buvo naudojami betono gaminiai su tam tikru užpildu: polistireno, PET, stiklo plastiko dalelėmis ir gumos granulėmis. Eksperimentinio tyrimo metu, siekiant nustatyti betono gaminių gniuždymo stiprį, buvo naudojami 100 x 100 x 100 mm dydžio kubo formos bandiniai. Iš viso atlikti 48 bandymai (29 pav.), papildomai padaryti 3 bandymai be užpildo, toliau vadinami kontrole. Betono bandiniai buvo gaminami į juos pridedant 3 % arba 5 % atitinkamų užpildo dalelių į cemento ir vandens mišinį. Betono bandinių užpildo dalelių dydis buvo 3 mm ir 5 mm. Bandiniai iki atliekant gniuždymo stiprio tyrimą, buvo laikomi vandenyje 28 paras.

Atliktų bandymų gniuždymo stiprio rezultatai pateikiami 26-29 lentelėse.

26 lentelė. Betono su gumos granulėmis stiprio gniuždant rezultatai

Bandinio Nr.	Užpildo dydis, kiekis	Gniuždomojo betono stiprio reikšmės $\sigma$ , MPa	Vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma$	Variacijos koeficientas $v$
Nr. 1	Betono mišinys be gumos granulių	40,80 ± 1,71	2,96	7,24
Nr. 2	Betono bandiniai su gumos granulėmis 3 mm 3 %	33,88 ± 0,49	0,85	2,52
Nr. 3	Betono bandiniai su gumos granulėmis 3 mm 5 %	32,25 ± 1,15	1,99	6,17
Nr. 4	Betono bandiniai su gumos granulėmis 5 mm 3 %	36,21 ± 2,93	5,08	14,02
Nr. 5	Betono bandiniai su gumos granulėmis 5 mm 5 %	34,83 ± 0,99	1,71	4,92

27 lentelė. Betono su polistireno dalelėmis stiprio gniuždant rezultatai

Bandinio Nr.	Užpildo dydis, kiekis	Gniuždomojo betono stiprio reikšmės $\sigma$ , MPa	Vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma$	Variacijos koeficientas $v$
Nr. 1	Betono bandiniai su polistireno dalelėmis 3 mm 3 %	32,67 ± 1,33	2,3	7,05
Nr. 2	Betono bandiniai su polistireno dalelėmis 3 mm 5 %	34,01 ± 2,08	3,61	10,61
Nr. 3	Betono bandiniai su polistireno dalelėmis 5 mm 3 %	36,95 ± 1,68	2,92	7,89
Nr. 4	Betono bandiniai su polistireno dalelėmis 5 mm 5 %	33,54 ± 1,90	3,3	9,83

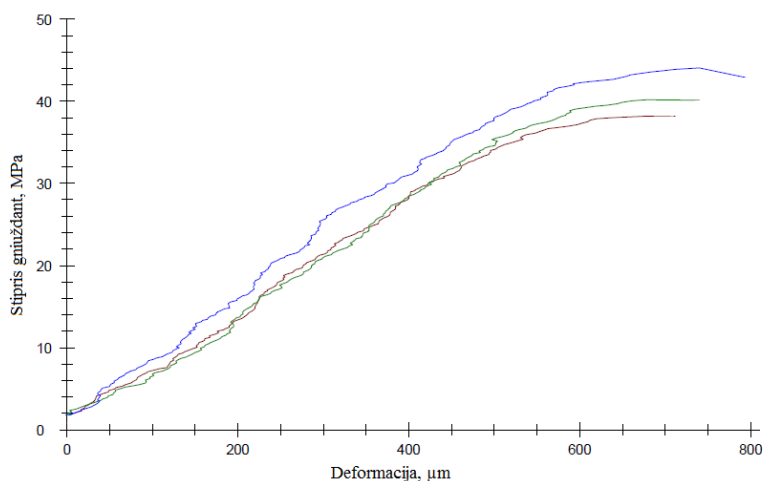
28 lentelė. Betono su PET dalelėmis stiprio gniuždant rezultatai

Bandinio Nr.	Užpildo dydis, kiekis	Gniuždomojo betono stiprio reikšmės $\sigma$ , MPa	Vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma$	Variacijos koeficientas $v$
Nr. 1	Betono bandiniai su PET dalelėmis 3 mm 3 %	39,74 ± 0,95	1,65	4,14
Nr. 2	Betono bandiniai su PET dalelėmis 3 mm 5 %	35,60 ± 1,40	2,43	6,82
Nr. 3	Betono bandiniai su PET dalelėmis 5 mm 3 %	36,66 ± 1,79	3,11	8,48
Nr. 4	Betono bandiniai su PET dalelėmis 5 mm 5 %	36,75 ± 1,33	2,31	6,29

29 lentelė. Betono su stiklo plastiko dalelėmis stiprio gniuždant rezultatai

Bandinio Nr.	Užpildo dydis, kiekis	Gniuždomojo betono stiprio reikšmės $\sigma$ , MPa	Vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma$	Variacijos koeficientas $v$
Nr. 1	Betono bandiniai su stiklo plastiko dalelėmis 3 mm 3 %	37,04 ± 1,70	2,94	7,93
Nr. 2	Betono bandiniai su stiklo plastiko dalelėmis 3 mm 5 %	38,74 ± 1,20	2,07	5,35
Nr. 3	Betono bandiniai su stiklo plastiko dalelėmis 5 mm 3 %	37,33 ± 2,08	3,60	9,64
Nr. 4	Betono bandiniai su stiklo plastiko dalelėmis 5 mm 5 %	38,62 ± 2,58	4,46	11,56

Gniuždymo stiprio kitimas priklauso nuo betono be užpildų (25 pav.) ir nuo įmaišomų užpildo dalelių dydžio ir jų kiekio (26, 27 pav. 30 lent.).



25 pav. Betono be užpildo gniuždymo stiprio reikšmės,  $n = 3$

Betono gniuždymo stipris, be užpildo dalelių, siekia  $40,80 \pm 1,71$  MPa. Kai betono gaminio sudėtyje yra 3 mm ir 3 % gumos granulių užpildo, tai stipris gniuždant siekia  $33,88 \pm 0,49$  MPa.

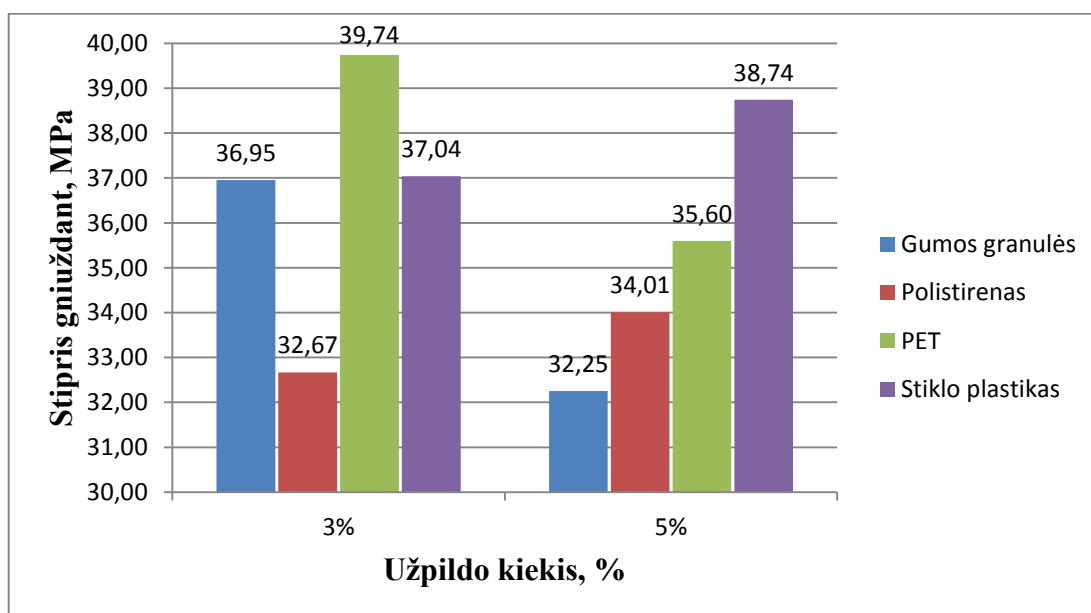
Esant tokiai pačiai 3 mm ir 3 % užpildo sudėčiai, polistireno stipris gniuždant siekia  $32,67 \pm 1,33$  MPa, su PET užpildu stipris gniuždant siekia  $39,74 \pm 0,95$  MPa, su stiklo plastiko užpildu,  $37,04 \pm 1,70$  MPa. Lyginant gautus rezultatus su betono be užpildo rezultatu, stipris gniuždant mažėja nuo 2,60 iki 19,93 %. Mažiausią stiprį gniuždant atlaikė betono bandinys su polistireno užpildu, o didžiausią stiprį atlaikė betono gaminys su PET užpildu.

Betono gaminio sudėtyje yra 3 mm ir 5 % gumos granulių užpildo, tai stipris gniuždant siekia  $32,25 \pm 1,15$  MPa. Esant tokiai pačiai 3 mm ir 5 % užpildo sudėčiai, polistireno stipris gniuždant siekia  $34,01 \pm 2,08$  MPa, su PET užpildu stipris gniuždant siekia  $35,60 \pm 1,40$  MPa, su stiklo plastiko užpildu,  $38,74 \pm 1,20$  MPa. Lyginant gautus rezultatus su betono be užpildo rezultatu, stipris gniuždant mažėja nuo 8,50 iki 11,25 %. Mažiausią stiprį gniuždant atlaikė betono bandinys su gumos granulių užpildu, o didžiausią stiprį atlaikė betono gaminys su stiklo plastiko užpildu.

30 lentelė. Stiprio gniuždant reikšmės, MPa

Užpildas	Stiprio gniuždant reikšmės, MPa			
	3 mm 3 %	5 mm 3 %	3 mm 5 %	5 mm 5 %
Gumos granulės	33,88	36,21	32,25	34,83
Polistirenas	32,67	36,95	34,01	33,54
PET	39,74	36,66	35,6	36,75
Stiklo plastikas	37,04	37,33	38,74	38,62

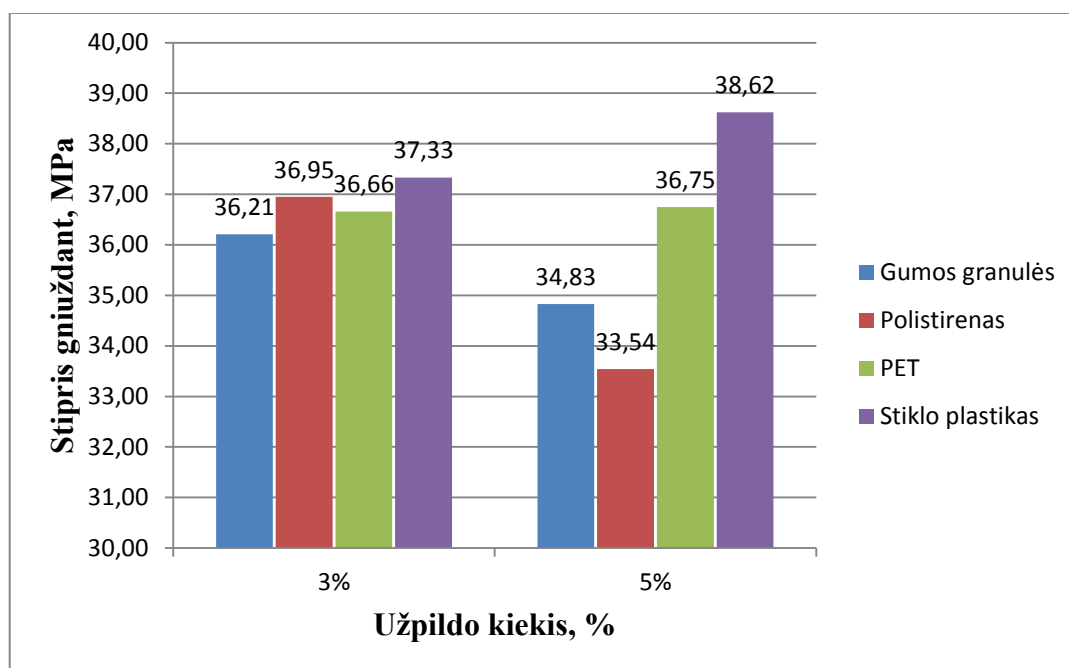
25 pav. Pateikti rezultatai su 3mm dydžio užpildo dalelėmis ir su 3 ir 5 % užpildo kiekiu.



26 Pav. Betono bandiniai su 3 mm dydžio užpildo dalelėmis.

Betono gaminio sudėtyje yra 5 mm ir 3 % gumos granulių užpildo, tai stipris gniuždant siekia  $36,21 \pm 2,93$  MPa. Esant tokiai pačiai 5 mm ir 3 % užpildo sudėčiai, polistireno stipris gniuždant siekia  $36,95 \pm 1,68$  MPa, su PET užpildu stipris gniuždant siekia  $36,66 \pm 1,79$  MPa, su stiklo plastiko užpildu,  $37,33 \pm 2,08$  MPa. Lyginant gautus rezultatus su betono be užpildo rezultatu, stipris gniuždant mažėja nuo 5,05 iki 20,96 %. Mažiausią stiprį gniuždant atlaikė betono bandinys su polistireno užpildu, o didžiausią stiprį atlaikė betono gaminys su stiklo plastiko užpildu.

Betono gaminio sudėtyje yra 5 mm ir 5 % gumos granulių užpildo, tai stipris gniuždant siekia  $34,83 \pm 0,99$  MPa. Esant tokiai pačiai 5 mm ir 5 % užpildo sudėčiai, polistireno stipris gniuždant siekia  $33,54 \pm 1,90$  MPa, su PET užpildu stipris gniuždant siekia  $36,75 \pm 1,33$  MPa, su stiklo plastiko užpildu,  $38,62 \pm 2,58$  MPa. Lyginant gautus rezultatus su betono be užpildo rezultatu, stipris gniuždant mažėja nuo 5,34 iki 17,79 %. Mažiausią stiprį gniuždant atlaikė betono bandinys su gumos granulių užpildu, o didžiausią stiprį atlaikė betono gaminys su stiklo plastiko užpildu.



27 Pav. Betono bandiniai su 5 mm dydžio užpildo dalelėmis.



28 pav. 100 x 100 x 100 mm kubo formos bandiniai su antrinių žaliavų užpildais

Remiantis eksperimentų rezultatais galima teigti, kad stiklo plastiko, polistireno, PET dalelių ir gumos granulių įtaka betono bandinių stipriui priklauso nuo dalelių dydžio ir jų kiekio. Kadangi betono gaminių užpildai neturėjo žymios įtakos betono stipriui, todėl galima naudoti 3 mm ir 5 mm dydžio stiklo plastiko daleles, kai jų kiekis siekia 5 % tūrio ir 5 mm dydžio stiklo plastiko daleles, kai kiekis siekia 3 % tūrio. Taip pat galima naudoti 3 mm dydžio PET daleles, kai jų kiekis siekia 3 % tūrio.

## IŠVADOS

1. Atlikus mokslinių darbų analizę nustatyta, kad betono gaminius su įprastai naudojamu užpildu (smėlio ar žvyro) galima dalinai arba pilnai pakeisti kitokiais užpildais, tokiais kaip stiklo plastiko, PET, polistireno dalelės ar gumos granulės. Užpildai dėl savo mažo svorio, energijos sugėrimo bei šilumos išsaugojimo savybių gali būti naudojami dangoraižių ar jūros platformų statybai, kur reikalaujama naudoti lengvus betono gaminius.
2. Išanalizavus betono gaminių principus nustatyta, kad užpildai naudojami betono gamyboje neturi būti daugiau nei 5 % viso užpildo kiekio, išskyrus jeigu užpildų yra daugiau negu 5 %, tai užpildai turi būti suskirstyti į smulkias ir stambias frakcijas, kurie atitinka standartą EN 12620:2000.
3. Eksperimentiniams tyrimams pasirinktos keturių rūšių antrinės žaliavos Bandinių tyrimai atlikti pagal gniuždymo stiprio standartą: LST EN 12390-3:2009. Eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo pagaminti betono bandiniai su užpildais iš stiklo plastiko, PET, polistireno dalelėmis ir gumos granulėmis. Remiantis kitų mokslininkų patirtimi tyrimuose keičiami du parametrai. Smulkintų dalelių dydis 3 mm ir 5 mm ir jų kiekis 3 % ir 5 %. Su kiekvienu užpildu ir atitinkamu užpildo kiekiu atlikta po tris bandinius. Iš viso atlikti 48 bandymai ir papildomai po tris be užpildo.
4. Atlikus gniuždymo bandymus nustatyta, kad įmaišant į betoną 3 mm ir 3 % užpildo, didžiausią stiprumą parodė bandinys su PET užpildu, kuris siekė 39,74 MPa (-2,60 %, lyginant su betonu be užpildų), su 3 mm ir 5 %, didžiausią stiprumą parodė bandinys su stiklo plastiku, kuris siekė 38,74 MPa (-5,05 %, lyginant su betonu be užpildų), 5 mm ir 3 %, didžiausią stiprumą parodė bandinys su stiklo plastiku, kuris siekė 37,33 MPa (-8,50 %, lyginant su betonu be užpildų) ir 5 mm 5 % taip pat didžiausią stiprumą parodė bandinys su stiklo plastiku, 38,62 MPa (-5,34 %, lyginant su betonu be užpildų).

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. ACI-211.1-89, Standard practice for selecting proportions normal, heavy weight, and mass concrete, 1989.
2. Alsayed S. H., Al-Salloum Y. A., Almusallam T. H. 2000. Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material. *Composites: Part B*, vol. 31, p. 555-567.
3. Asokan P., Osmani M., Price A. D. F. 2009. Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete. *Journal of Cleaner Production*, vol 17, p. 821-829.
4. Asokan P., Osmani M., Price A. D. F. 2010. Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic. *Construction and Building Materials*, vol. 24, p. 448-460.
5. Bagon, C. and Frondistou-Yannas, S., 1976. Marine floating concrete made with polystyrene expanded beads. *Magazine of Concrete Research*, vol. 28, no. 97, pp. 225–229.
6. CEMEX Unidad concreto Cemex, *Biblioteca del CIDETEC*, Cemex, Mexico City, Mexico, 1996.
7. Gailius A. 2012. Kompozicinės medžiagos ir dirbiniai energetiškai efektyvių pastatų statybai. [interaktyvus] [žiūrėta 2015m. sausio 14d.] Prieiga per internetą: <[http://dSPACE.vgtu.lt/bitstream/1/1368/1/1323\\_Gailius\\_Kompozicines\\_WEB.pdf](http://dSPACE.vgtu.lt/bitstream/1/1368/1/1323_Gailius_Kompozicines_WEB.pdf)>.
8. Garcia D., Vegas I., Cacho I. 2014. Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements. *Construction and Building Materials*, vol. 64, p. 293-300.
9. Gavrilov, J.; Sivilevičius, H., 2011. Transporto priemonių naudotų padangų utilizavimo ir regeneravimo technologijų analizė. Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos, „Mokslas – Lietuvos ateitis“. Vilnius: Technika.
10. Hoff, G. C., 1971. *New Applications for Low-Density Concretes*, vol. 29, ACI Special Publication.
11. Janutėnienė J., 2008. Kompozicinių medžiagų tyrimai. Mokomoji medžiaga.
12. Job S. 2010. Composite Recycling - Summary of recent research and development. [interaktyvus] [žiūrėta 2015m. sausio 14d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.compositesuk.co.uk/system/files/documents/Composite%20Recycling%20-%20Summary%20of%20recent%20research%20and%20development%20-%20September%202010.pdf>>.
13. Kerševičius, V.; Skripkiūnas, G. 2001. Gumos atliekų panaudojimas portlandcementiniame betone, Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba.
14. Laukaitis, A., Žurauskas, R. and Keriene, J. 2005. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 1, pp. 41–47.

15. Le Roy, R., Parant, R. and Boulay, C., 2005. Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 4, pp. 770–775.
16. Lietuvos atliekų tvarkymo dokumentas, 2014. Prieiga per internetą: <[https://www.e-tar.lt/rs/legalact/d833b6d0cfa811e3a8ded1a0f5aff0a9/format/OO3\\_ODT/](https://www.e-tar.lt/rs/legalact/d833b6d0cfa811e3a8ded1a0f5aff0a9/format/OO3_ODT/)>.
17. EN 12390-3:2009. Sukietėjusio betono bandymai.3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
18. EN 206-1:2000. Betonas. 1 dalis. Techniniai reikalavimai, savybės, gamyba ir atitiktis. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
19. M. Timofojev, 2007. Method of differential ultrasound speed measuring for compositional materials structure testing, Vilnius.
20. Malakauskas M., Malakauskas K. Betonavimo darbai. Lietuvos statybininkų asociacija, Vilnius 2009.
21. Martinėnas, B. Eksperimento duomenų statistinė analizė. Mokomoji knyga. 2– asis pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius, Technika, 2004.
22. Meira Castro A. C., Carvalho J. P., Ribeiro M. C. S., Meixedo J. P., Silva F. J. G., Fiuza A., Dinis M. L. 2014. An integrated recycling approach for GFRP pultrusion wastes: recycling and reuse assessment into new composite materials using Fuzzy Boolean Nets. *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, p. 420-430.
23. Meria Castro A. C., Reis J. M. L., Silva M. I., Paim L. M., Amorim F. C., Perrut V. A. 2014. Analysis of a glass fibre reinforced polyurethane composite repair. *Composite Structures*, vol. 114, p. 117-123.
24. Meria Castro A. C., Ribeiro M. C. M., Santos J., Meixedo J. P., Silva F. J. G., Fiuza A., Dinis M. L., Alvim M. R. 2013. Sustainable waste recycling solution for the glass fibre reinforced. *Construction and Building Materials*, vol. 45, p. 87-94.
25. Miled, K., Sab, K., and Le Roy, R., 2007. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modelling. *Mechanics of Materials*, vol. 39, no. 3, pp. 222–240.
26. Oliveux G., Bailleul J-L., Salle E. L. G. L. 2012. Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water. *Composites: Part A*, vol. 43, p. 1809-1818.
27. Rahmani E., Dehestani M., Beygi M. H. A., Allahyari H., Nikbin I. M. 2013. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials* vol. 47, p. 1302-1308.

28. Reda Taha, M. M.; EI-Dieb, A. S.; EI-Wahab, M. A.; Abdel-Hameed, M. E. 2008. Mechanical, Fracture, and Microstructural Investigations of Rubber Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* vol. 20(10), p. 640–649.
29. Shi W., Miao L., Luo J., Wang J., Chen Y., 2015. Durability of expanded polystyrene concrete after dynamic cyclic loading. *Shock and vibration*, vol. 2016, pp. 7.
30. Soong W. H., Raghavan J., Rizkalla S. H. 2011. Fundamental mechanisms of bonding of glass fiber reinforced polymer. *Construction and Building Materials*, vol. 25, p. 2813-2821.
31. Sri Ravindrarajah, R. and Tuck, A. J., 1994. Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 16, no. 4, pp. 273–277.
32. Techninės specifikacijos. Betono darbai. [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. gegužės 17d.]. Prieiga per internetą: <<http://jzum.lt/wp-content/uploads/2013/08/2-BETONO-DARBIAI-TS.pdf>>
33. Xu, Y., Jiang, L., Xu, J. and Li, Y., 2012. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 32–38.
34. Yang Y., Boom R., Heerden D-J., Kuiper P., Wit H. 2012. Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 51, p. 53-68.
35. Zhang S., Ramesh R. 2012. Recycling of glass fiber composites. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. sausio 12d.]. Prieiga per internetą: <<http://bada.hb.se/bitstream/2320/10928/1/Krishnamoorthi%20Shizhao.pdf>>.

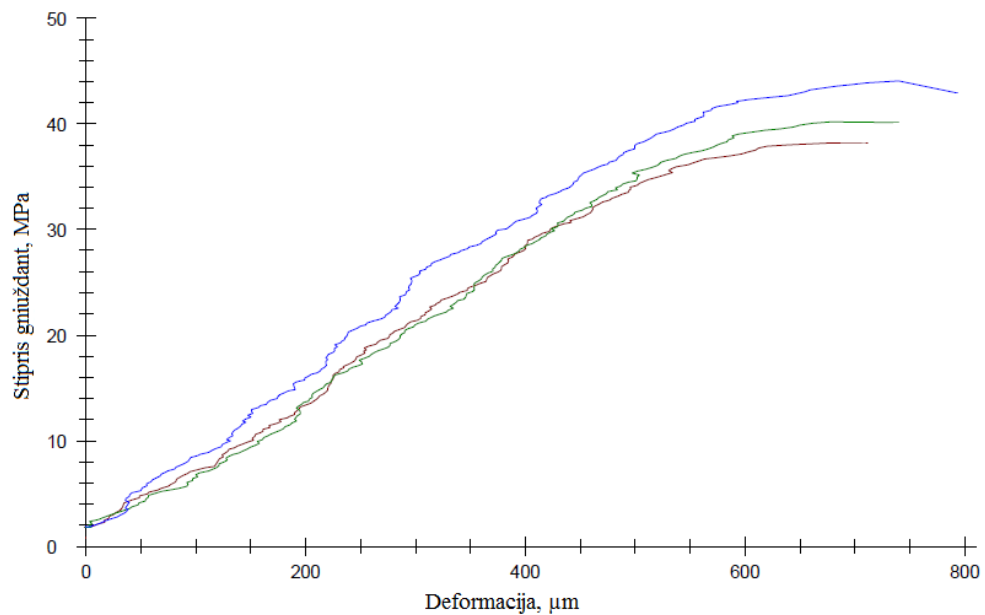
## **Priedai**

1 priedas. Betono stiprio gniuždant priklausomybė nuo užpildo dalelių. Betono be užpildo. Vidutinis stipris gniuždant 40,80 MPa.

### Rezultatai:

Nr.	$\sigma_m$ MPa	$F_m$ kN	$\epsilon_m$ %
1	38,21	396,18	0,71
2	40,18	409,02	0,68
3	44,02	432,59	0,74

### Grafikas:



### Statistikos duomenys:

$n = 3$	$\sigma_m$ MPa	$F_m$ kN	$\epsilon_m$ %
$\bar{X}$	40,80	412,60	0,71
s	2,96	18,47	0,03
v	7,24	4,48	4,30