

Civil engineering Statybos inžinerija

BETONO SU BIOKURO DEGINIMO PELENŲ PRIEDU FIZIKINIŲ IR MECHANINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI IR ANALIZĖ

Deividas AUGUTIS, Džigita NAGROCKIENĖ*

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2019 m. spalio 16 d.; priimta 2019 m. spalio 18 d.

Santrauka. Tyrimams atlikti naudojamas portlandcementis CEM I 42,5 R, lakieji biokuro deginimo pelenai, smulkus užpildas 0/4 frakcijos smėlis, stambus užpildas 4/16 frakcijos žvirgždas, vanduo ir superplastiklis „Viscocrete D187(V)“. Suformuotos 7 partijos bandinių su skirtingais biokuro deginimo pelenų kiekiais iki 30 % (rišamąją medžiagą pakeičiant lakiaisiais biokuro deginimo pelenais). Atlikus tyrimus nustatyta, kad betonų bandinių su biokuro deginimo pelenų priedu tankis, gniuždymo stipris, ultragarso impulso sklaidimo greitis, atvirasis poringumas, prognozuojamas betono atsparumas šalčiui ciklais didėja, o vandens įgėris ir uždarysis poringumas mažėja.

Reikšminiai žodžiai: betonas, lakieji biokuro deginimo pelenai, gniuždymo stipris, ultragarso impulso sklaidimo greitis, tankis, atsparumas šalčiui.

Įvadas

Betonas – tai plačiausiai naudojama statybinė medžiaga. Nuo cemento, užpildų, vandens ir įvairių priedų dozavimo tikslumo ir žaliavų kiekio priklauso betono mišinio bei gaminio kokybė, savybės. Užpildų granulimetrinė sudėtis, dalelių dydis turi didelę įtaką betono struktūrai, kuri lemia fizikines ir mechanines savybes (Žurauskienė, Naujokaitis, Mačiulaitis ir Žurauskas, 2012).

Plėtojantis statybai ir siekiant didžiausio pelno, reikia optimizuoti naudojamų išteklių kiekius, nepabloginant gaminių eksploatacinių charakteristikų. Šiuo metu vienas brangiausių betono mišinio komponentų yra cementas, kurio gamybai sunaudojami dideli kiekiai energinių ir žmogiškųjų išteklių.

Portlandcementis – hidraulinė rišamoji medžiaga, kietėjanti ir vandenyje, ir ore. Tai įvairaus dydžio dalelių mišinys, sudarytas iš skirtingų mineralų, dėl to jo hidratacija ir kietėjimas yra labai sudėtingas procesas, kurio metu įvairaus dydžio dalelės hidratuojasi skirtingu greičiu, o hidratacijos procesai iš dalies sutampa. Hidratacijos procesų metu susidarę hidratai sąveikauja ir dėl to kinta galutinė jų sudėtis. Betono stipriui įtakos turi visi klinkerio mineralai, nors jų hidratų vaidmuo betono struktūroje nevienodas (Nagrockiėnė ir Žurauskienė, 2008)

Šiuo metu yra labai svarbu ieškoti išeičių, kaip sumažinti betono savikainą. Viena iš jų – antrinių žaliavų naudojimas.

Mūsų šalyje plėtojant atsinaujinančių energijos šaltinių pramonę, o konkrečiai – biokuro katilinių pajėgumus, jų nenutrūkstamam darbui užtikrinti reikalingi dideli žaliavų kiekiai. Dažniausiai deginamos miškų kirtimų atliekos, šiaudai ir kitos biologinės atliekos. Didžioji šių atliekų dalis yra pelenai, kurie utilizuojami sąvartynuose.

Biokurą sudaro organinės ir mineralinės medžiagos, pastarosios degimo metu ne sudega, o nusėda katilo degimo zonoje arba būna sugaudoamos mechaniniais ir elektrosstatiniais filtrais. Degant biokurui, vyksta oksidacijos reakcija, kurios metu ir susidaro lakieji pelenai. Jie, esantys dūmuose, sugaunami elektrosstatiniame filtre, o iš jo, naudojant pneumatinio transporto sistemą, pelenai tiekiami į lakiųjų pelenų talpyklą.

Mokslininkai (Barbosa, Lapa, Dias ir Mendes, 2013), naudodami biokuro deginimo pelenus ir keisdami dalį cemento lakiaisiais pelenais, nustatė, kad optimalu keisti 10 % cemento masės pelenais, nes didžiausias gniuždymo stipris buvo pasiektas tų bandinių, kuriuose buvo 2,7 % lakiųjų pelenų nuo mišinio masės ir nuo 0 iki 21,7 % dugno pelenų nuo mišinio masės, lyginant su kontroliniais bandiniais,

*Autorius susirašinėti. El. paštas dzigita.nagrockiene@vgtu.lt

kietėjusiais 28 ir 90 parų. Blogiausi stiprio rezultatai buvo pasiekti visose bandinių partijose su 8,1 % lakiųjų pelenų, sumažinus cemento kiekį iki 18,8.

Darbo tikslas – ištirti biokuro deginimo pelenų poveikį betono savybėms, naudojant skirtingus jų kiekius, pakeičiančius cementą betone: 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 % nuo cemento masės.

1. Naudotos žaliavos ir metodai

Bandiniams formuoti naudojamas portlandcementis CEM I 42,5 R, atitinkantis LST EN 197-1:2011 standartą, smulkusis užpildas – smėlis, stambusis užpildas – žvirgždas, plastifikuojantis priedas, biokuro deginimo pelenai ir vanduo. Portlandcemenčio charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Portlandcemenčio charakteristikos
Table 1. Portland cement characteristics

Charakteristikos	Eksploatacinės savybės
Įprastiniai cementai	CEM I 42,5 R
Gniuždymo stipris, MPa: ankstyvasis stipris standartinis stipris	≥20,0 ≥42,5 ≤62,5
Rišimosi pradžia, min	≥60
Tūrio pastovumas, mm	≤10
Kaitmenys, %	≤5,0
Netirpmenys, %	≤5,0
Sulfatų (SO ₃) kiekis, %	≤4,0
Chloridų kiekis, %	≤0,10

Smulkusis užpildas yra smėlis, tai nuosėdinė uoliena (Kičaitė, 2001), susidedanti iš 0,05–4 mm skersmens įvairios formos (kampuotų, apzultintų) mineralų grūdelių, daugiausia kvarco, lauko špato, žėručio (Naujokaitis, 2007). Naudojamas 0/4 frakcijos smėlis, kuris atitinka LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus. Stambusis užpildas – žvirgždas, atitinkantis LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus. Žvirgždo ir smėlio fizikinės savybės pateiktos 2 lentelėje. Tyrimams buvo naudotas superplastiklis (ViscoCrete D187(V)).

2 lentelė. Žvirgždo ir smėlio fizikinės savybės
Table 2. Physical properties of sand and gravel

Užpildai	Frakcija	Charakteristikos	Vertė
Žvirgždas	4/16	Dalelių tankis, kg/m ³	2300
		Piltinis tankis, kg/m ³	1582
		Vandens įgeriamumas, %	0,59
Smėlis	0/4	Dalelių tankis, kg/m ³	2650
		Piltinis tankis, kg/m ³	1546
		Vandens įgeriamumas, %	1,30

Lakieji biokuro deginimo pelenai – tai organinių ir mineralinių medžiagų degimo produktas. Lakiųjų biokuro deginimo pelenų savybės pateiktos 3 ir 4 lentelėse.

3 lentelė. Lakiųjų biokuro deginimo pelenų fizikinės savybės
Table 3. Physical properties of biofuel combustion fly ash

Dalelių savitasis tankis	2,035 g/cm ³
Piltinis tankis	0,685 g/cm ³

4 lentelė. Lakiųjų biokuro deginimo pelenų cheminė sudėtis
Table 4. Chemical composition of biofuel combustion fly ash

CaO	9,96 %
SiO ₂	68,53 %
Al ₂ O ₃	6,51 %
Fe ₂ O ₃	2,15 %
MgO	1,14 %
SO ₃	1,04 %
K ₂ O	7,16 %
Na ₂ O	0,98 %
P ₂ O ₅	2,09 %
MnO ₂	0,33 %
Cl	0,11 %

Vanduo betono mišiniui ruošti turi būti švarus, be žalingų priemaišų, stabdančių normalų betono kietėjimą. Naudojamas vanduo, kuris atitinka LST EN 1008:2005 standartą.

Tyrimams atlikti laboratorijoje mechaniniu būdu buvo pagamintos 7 partijos betono bandinių. Bandiniai skyrėsi lakiųjų biokuro deginimo pelenų priedo kiekiu betone, atitinkamai nuo 0 % iki 30 % cemento masės kiekio (rišamąją medžiagą keičiant lakiaisiais biokuro deginimo pelenais). Betono mišinių sudėtys pateiktos 5 lentelėje. Betono mišiniai buvo maišomi laboratorijoje mechaniniu būdu formuojant bandinius 100×100×100 mm metalinėse formose. Po 24 valandų bandiniai buvo išimami iš formų ir 28 paras laikomi 20±2 °C temperatūros vandenyje. Po 28 parų kietėjimo 20±2 °C temperatūros vandenyje buvo nustatomas bandinių tankis pagal standartą LST EN 12390-7:2009, gniuždymo stipris – pagal standartą LST EN 12390-3:2009, ultragarso impulso sklidimo greitis – pagal standartą EN 12504-4:2004.

Bandinių vandens įgėris nustatytas bandinius 96 valandas mirkant vandenyje. Bandiniai panardinami į 20±2 °C temperatūros vandenį ir laikomi, kol bus pasiekta pastovi masė. Tarp bandinių turi būti mažiausiai 15 mm tarpai, o virš bandinių – mažiausiai 20 mm vandens. Pastovi masė buvo pasiekta, kai dviejų svėrimų kas 24 h rezultatai skyrėsi mažiau nei 0,1 %. Prieš svėrimą bandiniai nušluostomi sudrėkintu ir išgręžtu audeklu vandens pertekliui pašalinti.

Žinant betono poringumo parametrus ir remiantis Šeikino ir Dobšičiaus (Sheykin ir Dobshits, 1989) pasiūlyta metodika, galima prognozuoti betono atsparumą šalčiui. Atsparumo šalčiui kriterijus apskaičiuojamas pagal formulę:

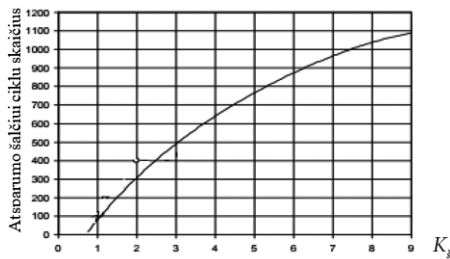
$$K_s = \frac{P_u}{0,09 \times P_a}, \quad (1)$$

čia P_u – uždarsis poringumas; P_a – atvirasis poringumas.

5 lentelė. Betono su lakiųjų pelenų priedu 1 m³ sudėtis
Table 5. The composition of concrete using the fly ash admixture

Pelenų kiekis (%)	Cementas (kg)	Žvirgždas (kg)	Smėlis (kg)	Vanduo (kg)	Pelenai (kg)	Superplastiklis (kg)	V/C santykis	Slankumo klasė
0	306	1006	925	159	0	1,836	0,52	S3
5	290,7	1006	925	159	15,3	1,836	0,52	S3
10	275,4	1006	925	159	30,6	1,836	0,52	S3
15	260,1	1006	925	159	45,9	1,836	0,52	S3
20	244,8	1006	925	159	61,2	1,836	0,52	S3
25	229,5	1006	925	159	76,5	1,836	0,52	S3
30	214,2	1006	925	159	91,8	1,836	0,52	S3

Apskaičiuavus atsparumo šalčiui kriterijų K_s , pagal empirinę priklausomybę prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais (1 paveikslas) (Skripkiūnas, 2007).

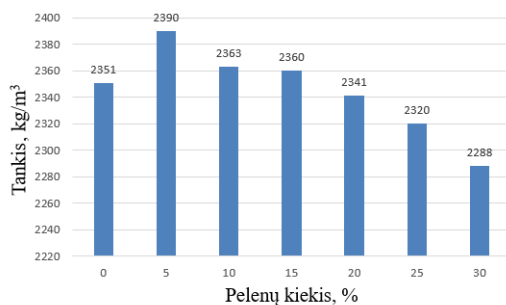


1 paveikslas. Atsparumo šalčiui ciklais priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus

Figure 1. Concrete resistance to frost cycles dependence on the frost resistance criterion

2. Tyrimų rezultatai ir analizė

Atlikus tankio nustatymo tyrimus buvo gauti rezultatai, pateikti 2 paveiksle. Iš gautų rezultatų galima matyti, jog, naudojant lakiuosius deginimo pelenus betone, jais keičiant cemento dalį, kinta jų tankis, priklausomai nuo naudojamų lakiųjų pelenų kiekio. Atlikus tyrimus, didžiausias tankis nustatytas bandinių, turinčių 5 % lakiųjų pelenų, ir yra 2390 kg/m³, o mažiausias tankis (2288 kg/m³) buvo bandinių su 30 % lakiųjų pelenų priedu.

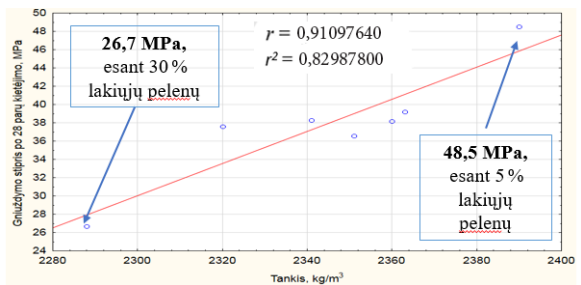


2 paveikslas. Betono tankio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų kiekio

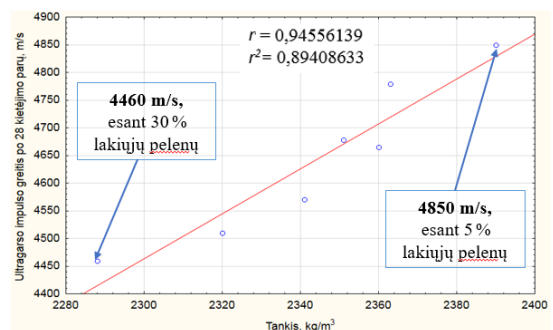
Figure 2. Concrete density dependence on the fly ash content

Atlikus gniuždymo stiprio po 28 kietėjimo parų tyrimus ir juos apdorojus su „Statistica“ programa, buvo gauti rezultatai, pateikti 3 paveiksle. Čia matoma didelė koreliacinė priklausomybė (83 %) tarp betono gniuždymo stiprio ir tankio. Galima matyti, kad didžiausią gniuždymo stiprį turėjo bandiniai su 5 % pelenų priedu ir yra 48,5 MPa. Mažiausias gniuždymo stipris (26,7 MPa) buvo bandinių, kurių 30 % pelenų pakeista cementu.

Atlikus ultragarso impulso sklidimo greičio po 28 kietėjimo parų tyrimus ir juos apdorojus su „Statistica“ programa, buvo gauti rezultatai, pateikti 4 paveiksle. Čia matoma didelė koreliacinė priklausomybė (89 %) tarp tankio ir ultragarso impulso sklidimo greičio. Yra matoma, jog didžiausias ultragarso impulso sklidimo greitis – 4850 m/s – buvo būdingas bandiniams, turintiems 5 %



3 paveikslas. Gniuždymo stiprio priklausomybė nuo tankio
Figure 3. Concrete compressive strength dependence on the density



4 paveikslas. Ultragarso impulso sklidimo greičio priklausomybė nuo tankio

Figure 4. Ultrasonic pulse velocity dependence on the density

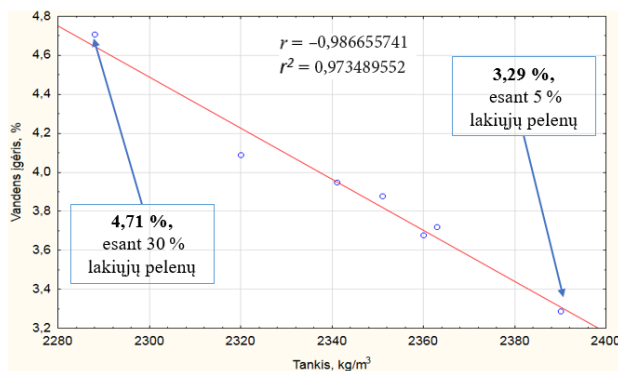
pelenų priedą. Mažiausias ultragarso impulso sklidimo greitis (4460 m/s) buvo bandinių su 30 % pelenų priedu. Didėjant tankiui, didėjo ir ultragarso impulso sklidimo greitis.

Atlikus vandens įgėrio tyrimus ir juos apdorojus su „Statistica“ programa, buvo gauti rezultatai, pateikti 5 paveiksle. Čia matoma didelė koreliacinė priklausomybė (97 %) tarp vandens įgėrio ir tankio. Matoma, jog didžiausią vandens įgėrį – 4,71 % – turėjo bandiniai su 30 % pelenų priedu. Mažiausias vandens įgėris (3,29 %) buvo būdingas bandiniams su 5 % pelenų priedu. Didėjant tankiui, mažėjo vandens įgėris.

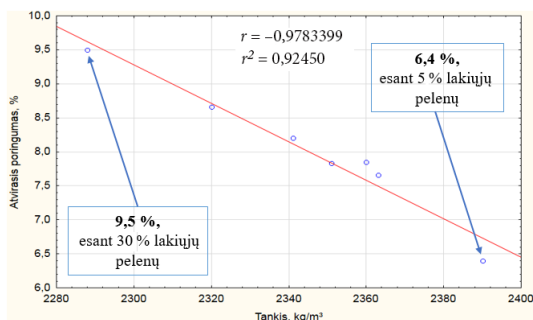
Nustatyta, kad visų bandinių vandens įgėris sparčiai didėja pirmąją mirkymo parą. Po šio laiko matomas lūžis ir tolesnis visų bandinių įgėrio didėjimas jau gana mažas. Vandens įgėrio kinetikos rezultatai pateikti 6 paveiksle.

Atlikus atvirojo poringumo skaičiavimus ir juos apdorojus su „Statistica“ programa, buvo gauti rezultatai, pateikti 6 paveiksle. Čia matoma didelė koreliacinė priklausomybė (92 %) tarp tankio ir atvirojo poringumo. Matoma, kad didžiausią atvirąjį poringumą – 9,5 % – turėjo bandiniai su 30 % pelenų priedu. Mažiausias atvirasis poringumas (6,4 %) buvo būdingas bandiniams su 5 % pelenų priedu. Didėjant tankiui, mažėjo atvirasis poringumas.

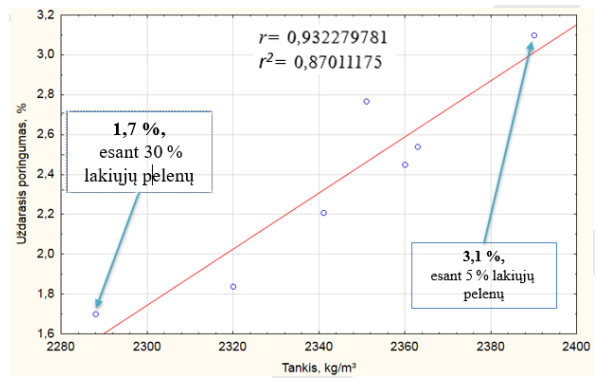
Atlikus uždarojo poringumo skaičiavimus ir juos apdorojus su „Statistica“ programa, buvo gauti rezultatai, pateikti 7 paveiksle. Čia matoma didelė koreliacinė priklausomybė (87 %) tarp tankio ir uždarojo poringumo. Matoma, kad didžiausias uždarusis poringumas buvo bandinių



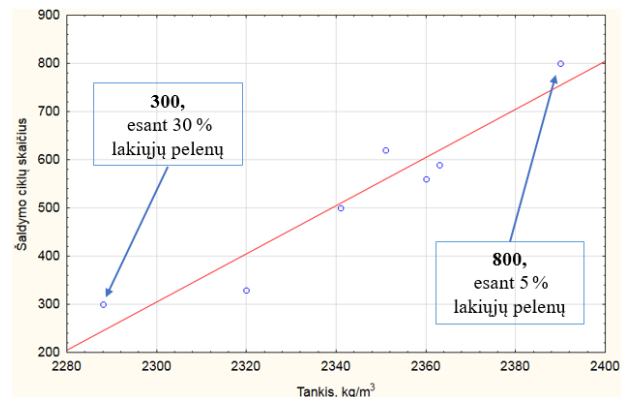
5 paveikslas. Vandens įgėrio priklausomybė nuo tankio
Figure 5. Water absorption dependence on the density



6 paveikslas. Atvirojo poringumo priklausomybė nuo tankio
Figure 6. Open porosity dependence on the density



7 paveikslas. Uždarojo poringumo priklausomybė nuo tankio
Figure 7. Closed porosity dependence on the density



8 paveikslas. Prognozuojamo atsparumo šalčiui pagal atšaldymo ir atšildymo ciklus priklausomybė nuo tankio
Figure 8. Forecasted freeze-thaw cycles dependence on the density

su 5 % pelenų įmaiša ir siekė 3,1 %. Mažiausias uždarusis poringumas (1,7 %) buvo bandinių su 30 % pelenų įmaiša. Didėjant tankiui, didėjo ir uždarusis poringumas.

Prognozuojamas atsparumas šalčiui pagal užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičių bandiniuose priklausomai nuo biokuro deginimo lakiųjų pelenų kiekio juose svyravo tarp 300 ir 800 ciklų. Šie rezultatai pateikti 8 paveiksle. Priklausomai nuo pelenų kiekio betono mišinyje, mažiausias jo atsparumas šaldymo ciklams buvo nustatytas bandiniuose su 30 % pelenų priedu ir yra 300 ciklų. Didžiausias atsparumas šalčiui nustatytas iki 800 ciklų bandiniuose su 5 % cemento pakeitus biokuro deginimo pelenais.

Išvados

1. Nustatyta, kad, didinant biokuro deginimo pelenų kiekį iki 15 % ir pakeičiant cementą, didėja ir bandinių tankis, kuris siekia iki 2360 kg/m^3 . Toliau didinant pelenų kiekį, tankis pradėjo mažėti. Tankio didžiausia reikšmė (2390 kg/m^3) buvo nustatyta bandinių, kurių sudėtyje buvo 5 % biokuro deginimo pelenų. Šių bandinių tankio reikšmė, lyginant su bandiniu be lakiųjų pelenų, procentiškai yra didesnė 1,66 %.

2. Nustatyta, kad prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais, priklausomai nuo biokuro deginimo pelenų kiekio juose, svyravo tarp 300 ir 800. Priklausomai nuo pelenų kiekio betono mišinyje, mažiausias jo prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais nustatytas bandiniuose, kuriuose yra 30 % pelenų priedo ir yra 300 ciklų. Didžiausias prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais nustatytas 800 ciklų bandiniuose su 5 % biokuro deginimo pelenų priedu.
3. Atlikus statistinę analizę su „Statistica“ programa, gautos tiesinės regresijos lygtys. Nustatyta, kad, didėjant betono tankiui, didėja betono gniuždymo stipris po 28 kietėjimo parų, ultragarso impulso sklidimo greitis – po 28 kietėjimo parų, taip pat uždarasis poringumas, prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais, bet mažėja betono įgėris ir atvirasis poringumas.

Literatūra

- Barbosa, R., Lapa, N., Dias, D., & Mendes, B. (2013). Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances. *Construction and Building Materials*, 48, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.031>
- Kičaitė, A. ir Mačiulaitis, R. (2001). *Neorganinių rišamųjų medžiagų ir užpildų tyrimo metodai. Laboratoriniai darbai*. Vilnius: Technika. <https://doi.org/10.3846/505-S>
- LST EN 12390-3:2009. *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris*. Vilnius. 16 p.
- LST EN 12390-7:2009. *Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis*. Vilnius. 10 p.
- LST EN 12620:2003+A1:2008. *Betono užpildai*. Vilnius.
- LST EN 197-1:2011. *Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai*. Vilnius. 26 p.
- Nagročkienė, D. ir Žurauskienė, R. (2008). *Statybinės medžiagos ir jų gaminiai: mokomoji knyga* (2-oji pataisyta laida). Vilnius: Technika. 183 p. <https://doi.org/10.3846/910-S>
- Naujokaitis, A. (2007). *Statybinės medžiagos. Betonai: mokomoji knyga* (p. 163–190). Vilnius: Technika. <https://doi.org/10.3846/966-S>
- Sheykin, A. E., & Dobshits, L. M. (1989). *Tsementnye betony vysokoy morozostoykosti*. Stroyizdat, Len. Otd, L. (rusų k.).
- Skripkiūnas, G. (2007). *Statybinių konglomeratų struktūra ir sąvybės*. Kaunas: Vitae Litera.
- Žurauskienė, R., Naujokaitis, A. P., Mačiulaitis, R. ir Žurauskas, R. (2012). *Statybinės medžiagos*. Vilnius: Technika. 540 p.

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES RESEARCH AND ANALYSIS OF CONCRETE WITH BIOFUEL COMBUSTION FLY ASH SUPPLEMENT

D. Augutis, Dž. Nagročkienė

Abstract. Materials used for the study: Portland cement CEM I 42,5 R, 0/4 fraction sand, 4/16 fraction gravel, biofuel fly ash, superplastizer *ViscoCrete D187 (V)* and water. Seven compositions of concrete were designed by replacing 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% of cement with biofuel fly ash. The article analyses the effect of biofuel fly ash content on the properties of concrete. Studies have shown that the increase of biofuel fly ash content up to 15% increases concrete density and compressive strength after 28 days of curing, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, closed porosity, concrete forecasted freeze-thaw cycles and decreases water absorption, open porosity.

Keywords: concrete, biofuel fly ash, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, density, frost resistance.