

Primljen / Received: 22.4.2018.

Ispravljen / Corrected: 10.2.2019.

Prihvaćen / Accepted: 20.5.2019.

Dostupno online / Available online: 10.5.2020.

Mehanička svojstva geopolimernog morta s dodatkom letećeg pepela klasa C i F

Autori:



¹Doc.dr.sc. **Mehmet Kaya**
mehmet.kaya@bozok.edu.tr
 Autor za korespondenciju



²Izv.prof.dr.sc. **Mücteba Uysal**
mucteba.uysal@istanbul.edu.tr



³Prof.dr.sc. **Kemalettin Yilmaz**
kmyilmaz@sakarya.edu.tr



⁴Prof.dr.sc. **Okan Karahan**
okarahan@erciyes.edu.tr



⁴Prof.dr.sc. **C. Duran Atiş**
cdatis@erciyes.edu.tr

¹Sveučilište Yozgat Bozok, Turska
 Odjel za građevinarstvo

²Sveučilište u Istanbulu, Turska
 Odjel za građevinarstvo

³Sveučilište Sakarya, Turska
 Odjel za građevinarstvo

⁴Sveučilište Erciyes, Turska
 Odjel za građevinarstvo

Izvorni znanstveni rad

Mehmet Kaya, Mücteba Uysal, Kemalettin Yilmaz, Okan Karahan, C. Duran Atiş

Mehanička svojstva geopolimernog morta s dodatkom letećeg pepela klasa C i F

U ovom se radu ocjenjuju i uspoređuju mehanička svojstva geopolimernog morta s dodatkom letećeg pepela klasa C i F. Leteći pepeo je aktiviran kombiniranom alkalnom otopinom NaOH i Na₂SiO₃ te je razvoj čvrstoće praćen u razdoblju od godinu dana. Uočeno je da vrijednosti tlačne čvrstoće variraju od 10,22 i 15,83 MPa kod mješavina geopolimernog morta s dodatkom letećeg pepela klase C. Tlačna čvrstoća geopolimernog morta s dodatkom letećeg pepela klase F iznosila je do 56,44 MPa.

Ključne riječi:

leteći pepeo, geopolimer, aktivator, tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje

Original scientific paper

Mehmet Kaya, Mücteba Uysal, Kemalettin Yilmaz, Okan Karahan, C. Duran Atiş

Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars

Mechanical properties of geopolymer mortar made with class F fly ash and class C fly ash are evaluated and compared in this paper. Fly ashes were activated with a combined NaOH and Na₂SiO₃ alkali solution, and their strength development was observed during one year. It was observed that compressive strength values were between 10.22 and 15.83 MPa for geopolymer mortar mixtures made with class C fly ash. The values of up to 56.44 MPa were obtained for geopolymer made with class F fly ash.

Key words:

fly ash, geopolymer, activator, compressive strength, flexural strength

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Mehmet Kaya, Mücteba Uysal, Kemalettin Yilmaz, Okan Karahan, C. Duran Atiş

Mechanische Eigenschaften von Geopolymermörtel unter Zusatz von Flugasche der Klasse C und F

In dieser Abhandlung werden die mechanischen Eigenschaften von Geopolymermörtel unter Zusatz von Flugasche der Klasse C und F bewertet und verglichen. Flugasche wird durch eine kombinierte alkalische Lösung von NaOH und Na₂SiO₃ aktiviert und die Festigkeitsentwicklung wird in einem Zeitraum von einem Jahr überwacht. Es wurde beobachtet, dass die Druckfestigkeitswerte bei Mischungen des Geopolymermörtels mit Zusatz der Flugasche der Klasse C von 10,22 bis 15,83 MPa variieren. Die Druckfestigkeit des Geopolymermörtels mit Zusatz von Flugasche der Klasse F betrug bis 56,44 MPa.

Schlüsselwörter:

Flugasche, Geopolymer, Aktivator, Druckfestigkeit, Biegefestigkeit

1. Uvod

Zeleni cementni proizvodi isključeni su iz kategorije zelenih proizvoda zbog štetnih utjecaja kao što su: onečišćenje prirodnog tla tijekom proizvodnje sirovina, velika količina energije potrebna za proizvodnju cementa, te izuzetno velike emisije ugljičnog dioksida. Na globalnoj razini, 5 do 8 % emisija ugljičnog dioksida generira se uslijed ljudskog djelovanja upravo u industriji cementa. Poznato je da proizvodnja jedne tone cementa dovodi do emisije otprilike jedne tone CO₂ [1]. Unatoč tako nepovoljnoj situaciji, činjenica je da je u 2016. godini u dvadeset razvijenih zemalja diljem svijeta proizvedeno čak 4,6 milijardi tona cementa [2]. Energija sudjeluje sa 51,9 % u cijeni proizvodnje cementa [3]. Stoga, globalno gledajući, 5 % CO₂ koji se ispušta u atmosferu dolazi iz cementne industrije, a 20 % iz goriva na bazi ugljena [4]. S druge strane, danas je istraživanje moguće primjene industrijskog otpada jedan od najvažnijih zadataka u području upravljanja otpadom. Leteći pepeo iz industrijskog otpada zapravo je vrlo sitan prah koji se javlja kao nusproizvod rada termoelektrana na ugljen. Prema normi ASTM C618, leteći pepeo klase F dobiva se iz bitumenskog ugljena pri čemu je suma SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 70 %. Pepeo koji ulazi u klasu C općenito se može opisati kao pepeo koji se dobiva iz lignita i polu-bitumenskog ugljena a sadrži SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 50 % [5]. Kako bi se spriječilo štetno djelovanje letječeg pepela, primjenjuju se razne metode njegova pohranjivanje u odgovarajuće prostore. Od ukupnih količina letječeg pepela koje se svake godine ispuštaju na globalnoj razini, otprilike 900 milijuna tona, tj. otprilike 52,2 %, koristi se u mnogim sektorima kao reciklirani materijal [6, 7]. Pohranjivanje milijuna tona letječeg pepela koji se ne može reciklirati ozbiljan je ekološki problem, a ujedno predstavlja i vrlo velik trošak. Do sada su provedene mnoge znanstvene studije kako bi se pronašao vezivni materijal kao alternativa za cement, a sve zato da se smanje negativni utjecaji cementne industrije na okoliš te da se omogući ponovna uporaba industrijskog otpada. Alternativna cementna veziva mogu se proizvesti aktivacijom prirodnog i industrijskog otpada, kao što su zgura iz visokih peći, leteći pepeo, metakaolin i crveni mulj, koristeći razne lužine [8]. Još od 1960. godine, materijali kao što su zgura iz visokih peći, metakaolin, glina, mješavina vapna i cementa i leteći pepeo miješaju se s raznim alkalnim aktivatorima te se provode istraživanja radi proizvodnje vezivnih materijala kao alternative za cement [9]. Studije o alkalno aktiviranim mortovima nastavile su se objavljivati u sedamdesetim godinama prošlog stoljeća te je na temelju istraživanja koje je 1975. godine proveo Davidovits razvijen geopolimer [10]. U posljednja dva desetljeća objavljuje se sve veći broj radova o razvoju proizvodnje betona na bazi geopolimera [11]. Kemijski postupci koji se odvijaju u strukturi geopolimera još nisu potpuno razjašnjeni. Do sada su objavljeni tek neki pojednostavljeni opisi tog procesa [12]. Reakcije koje se odvijaju tijekom polimerizacije mogu

se podijeliti u tri osnovne etape: otapanje aluminosilikatnih krutina, formiranje gela i polikondenzacija [13]. U proizvodnji geopolimera, kemikalije na bazi lužina koriste se kao aktivatori, a najpoznatiji alkalni aktivatori su kemijske mješavine kao što su NaOH, KOH i Na₂SiO₃. Najveća mehanička čvrstoća zabilježena je pri korištenju KOH-a u različitim omjerima [14]. Aktivatori utječu na poroznost geopolimera [15]. Bez obzira na vrstu aktivatora, tlačna se čvrstoća povećava usporedno s povećanjem udjela aktivatora. pH vrijednost aktivatorske otopine utječe na čvrstoću geopolimera. Khale i Chaudhary [16] navode da je izmjerena čvrstoća uzoraka s pH-vrijednošću od 14 bila pedeset puta veća od čvrstoće uzoraka kod kojih je pH vrijednost iznosila 12. Oni su zaključili da optimalan raspon pH za geopolimer visoke čvrstoće iznosi 13-14 [16]. Kada se cement pomiješa s vodom, dobiva se očvrslu C-S-H gel te se formira očvrslu N-A-S-H gel. Kada je voda prisutna u strukturi C-S-H gela, tada nestaje proizvod reakcije vode u gelastoj strukturi N-A-S-H-a. Zbog toga je geopolimer lakši od cementnih sustava i odlikuje se strukturom koja je izolirajuća i otporna na djelovanje temperature [17]. U proizvodnji geopolimernog betona, parametri koji najviše utječu na svojstva geopolimera jesu mljevenje, temperatura i trajanje njege, te vrsta i količina lužine [18]. Najpovoljnija svojstva letječeg pepela dobivaju se pomoću alkalne aktivacije i hlapljive krunaste veze, tj. manje od 5 % netopivih ostataka, mala količina slobodnog vapna, 40-50 % reaktivnog silicija, 80-90 % udjela pepela veličine manje od 45 mikrona, te velik udio staklaste strukture u letjećem pepelu [19]. Alkalnost pri alkalnoj aktivaciji iznosi otprilike pH=2, a omjer SiO₂ / Al₂O₃ iznosi 2 [deg.] [20]. Aktivacija letječeg pepela može se postići miješanjem NaOH [21-23], KOH [24, 25], Na₂SiO₃ [26, 27] i NaOH+Na₂SiO₃ u raznim omjerima [28-30]. Osim posrednošću letječeg pepela, geopolimer se može proizvesti i pomoću aktivirajućih materijala kao što su zgura iz visokih peći [20, 31], otpadni aluminijev hidroksid [32], mješavine letječeg pepela i zgure iz visoke peći, mješavine plovuča, cementa i vapna [33] i metakaolin [34, 35]. Neki autori izvještavaju da se visoka čvrstoća na savijanje i tlačna čvrstoća mogu dobiti alkalnom aktivacijom letječeg pepela klase F [36]. Poroznost geopolimera varira ovisno o sastavu geopolimera proizvedenih s letjećim pepelom klase F. Pritom se uočava visoka otpornost na temperaturu, skupljanje, abraziju i vodoupojnost, dok je otpornost na sulfate niska [28]. Za sada nema dovoljno iskustava u primjeni letječeg pepela s visokim udjelom vapna. Međutim, treba napomenuti da su zabilježene poteškoće kod primjene velike količine vapna pri aktivaciji letječeg pepela klase C [28]. Zbog toga se vrlo rijetko provode istraživanja o aktivaciji letječeg pepela klase C. Danas raste zanimanje istraživača za analiziranje mehaničkih svojstava i trajnosti geopolimera. U ovom se radu svojstva geopolimernih mortova određuju primjenom dvije različite klase letječeg pepela, tj. klase F i klase C, nakon čega se u završnom dijelu rada prikazuju i uspoređuju ostvareni rezultati.

2. Materijali i metode

2.1. Materijali

U mješavinama morta koje se analiziraju u ovom radu upotrijebljena je voda iz slavine. Kemijska svojstva vode iz slavine iskazana su u tablici 1.

Tablica 1. Kemijska svojstva vode iz slavine

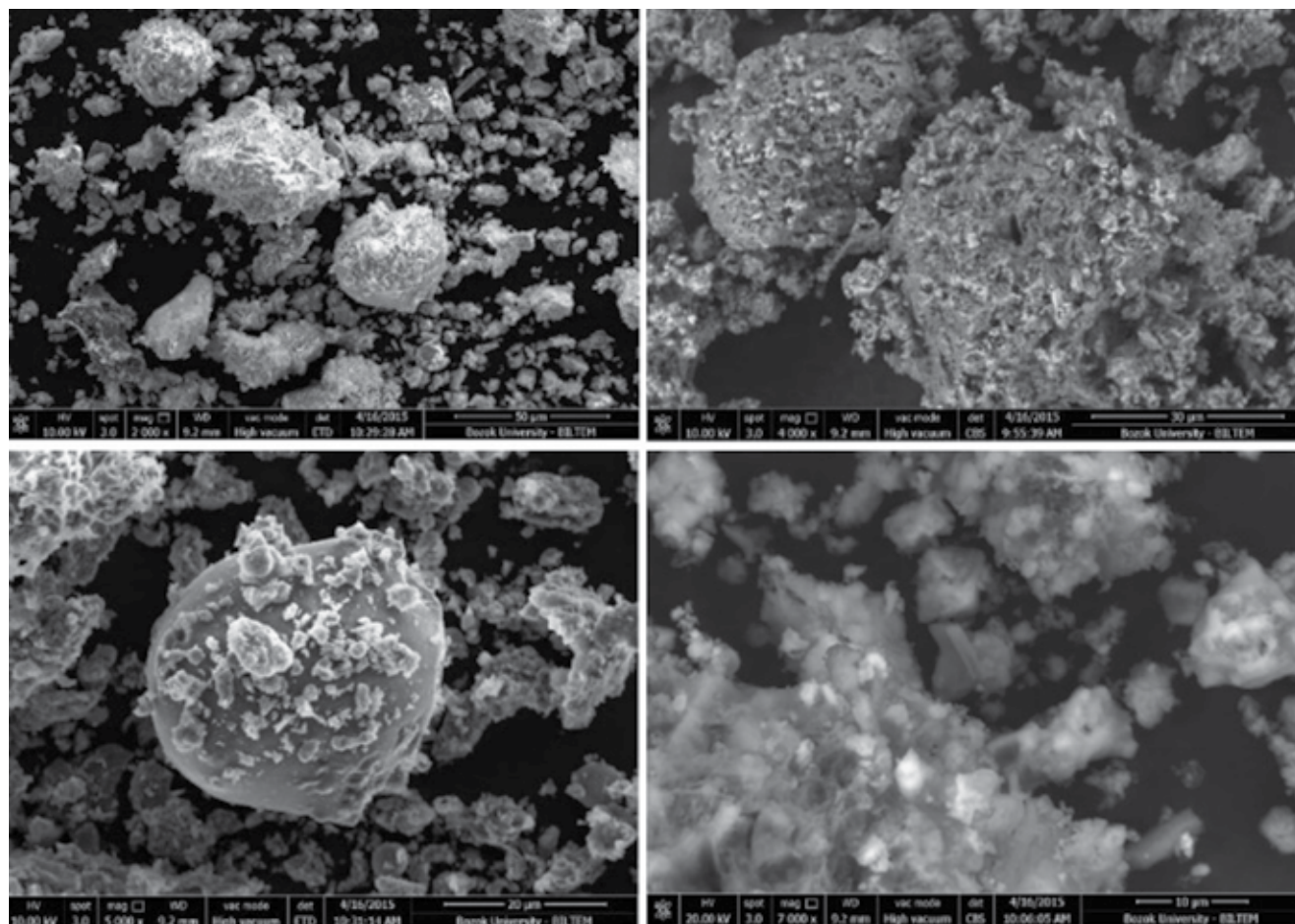
Al [μg/l]	Fe [μg/l]	Amonijak [μg/l]	Provodljivost [μg/cm]	Nitrit [μg/l]	pH
0	0,14	9	715	0	7,66

U ovom je istraživanju upotrijebljen leteći pepeo klase F i klase C koji je dopremljen iz turskih termoelektrana. Fizikalna i kemijska svojstva letećeg pepela prikazana su u tablici 2.

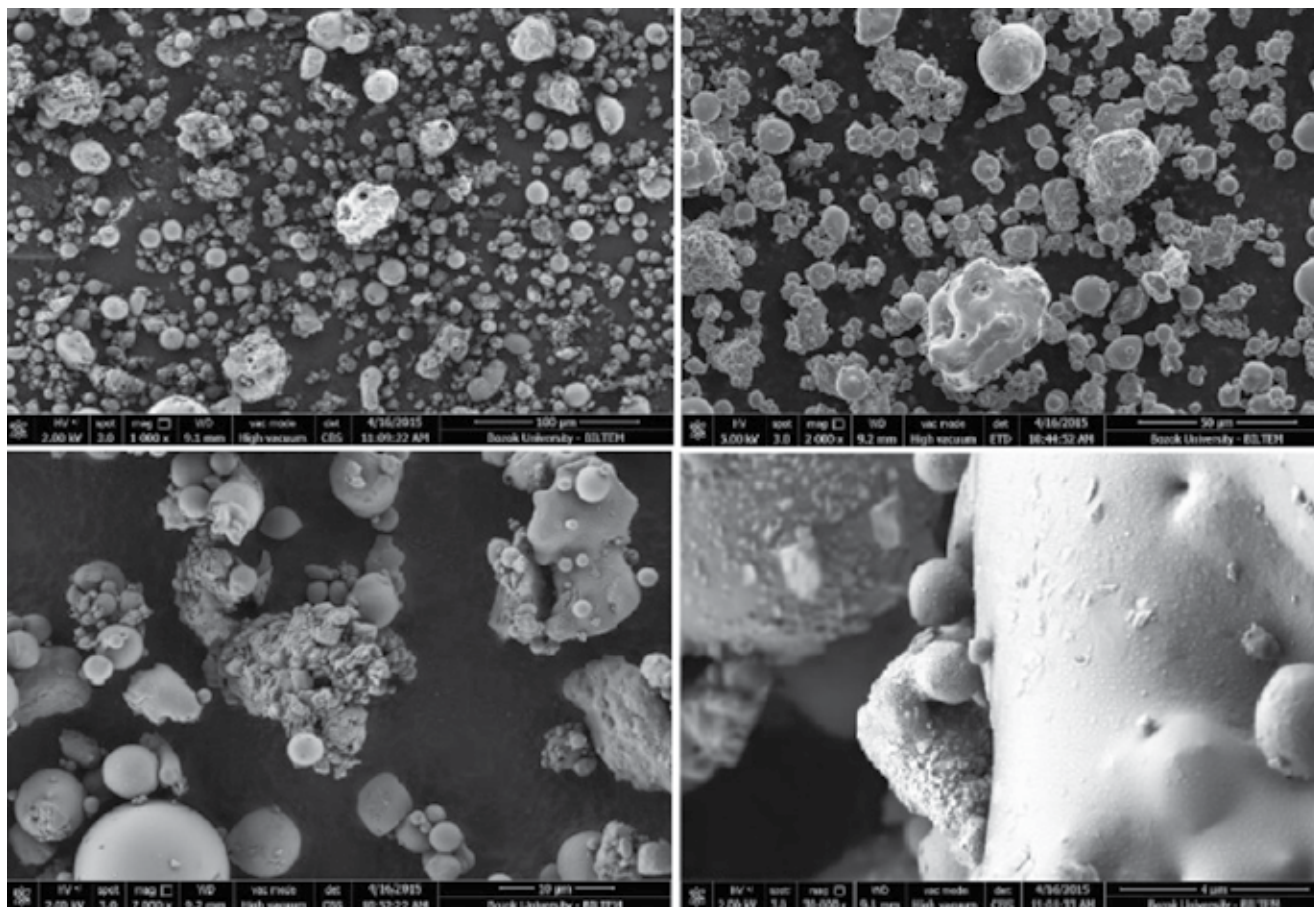
Mikrografi letećeg pepela klase F, snimljeni pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) u raznim stupnjevima povećanja, prikazani su na slici 1. Mikrografi letećeg pepela klase C, snimljeni pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM), prikazani su na slici 2.

Tablica 2. Fizikalna i kemijska svojstva letećeg pepela klase F i klase C

Kemijska svojstva	Klasa letećeg pepela	
	F [%]	C [%]
MgO	3,68	3,12
Al ₂ O ₃	21,41	14,2
SiO ₂	58,73	35,01
SO ₃	0,25	7,56
Na ₂ O	0,28	1,21
Ka ₂ O	1,65	1,06
CaO	1,88	25,75
Fe ₂ O ₃	10,46	5,42
Netopivi ostatak	24,33	24,21
Gubitak žarenjem (LOI)	0,64	6,02
UKUPNO	98,98	99,35
Fizikalna svojstva		
Specifična težina [t/m ³]	2,24	2,72
Ostatak na situ od 45 mikrona [%]	4,9	44,3
Specifična površina prema Blaineu [cm ² /g]	3703	3320

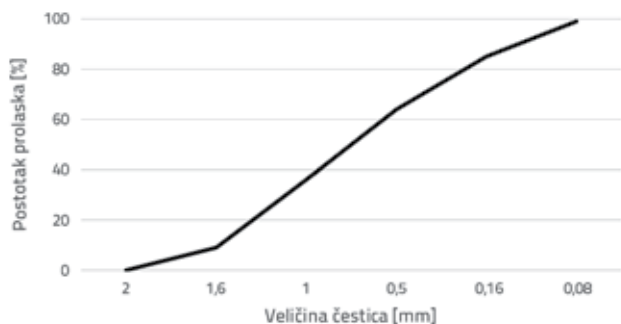


Slika 1. Mikrografi letećeg pepela klase F snimljeni pretražnim elektronskim mikroskopom u raznim stupnjevima povećanja



Slika 2. Mikrografi letećeg pepela klase C snimljeni pretražnim elektronskim mikroskopom u raznim stupnjevima povećanja

U eksperimentalnom dijelu je korišten standardizirani pijesak CEN prema normi TS EN 196-1: 2005 [37]. Standardna granulometrija pijeska i odgovarajuće granične vrijednosti prikazane su na slici 3., prema kojoj se može zaključiti da je granulometrija pijeska u skladu sa zahtjevima norme.



Slika 3. Standardna granulometrija pijeska

U eksperimentalnom dijelu korišten je 97-postotni natrijev hidroksid (NaOH), čija su kemijska svojstva prikazana u tablici 2. Natrijev silikat, također poznat pod nazivom "staklena voda", isporučan je kao tekućina u zatvorenim plastičnim i staklenim spremnicima. Kemijska svojstva natrijevog silikata koji je korišten u studiji prikazana su u tablici 3.

Tablica 3. Kemijska svojstva NaOH

Kemijski naziv	Natrijev hidroksid
Kemijska formula	NaOH
Molekularna težina	40 g/mol
Acidimetrija	≥ 97
Na ₂ CO ₃	≤ 1
Cl	< 0,01
SO ₄	≤ 0,01
Udio teških metala	≤ 0,002
Al	≤ 0,002
Fe	≤ 0,002

Tablica 4. Kemijska svojstva Na₂SiO₃

Kemijski naziv	Natrijev silikat
Kemijska formula	Na ₂ SiO ₃ nH ₂ O
Molekularna težina	122,06 g/mol
Gustoća	1,39 g/cm ³ (pri 20 °C)
Izmjereni modul SiO ₂ /Na ₂ O	2,00
Na ₂ O	12,01 %
SiO ₂	24,15 %
Željezo (Fe)	36 ppm
Klor (Cl)	0,01 %
Sulfat (SO ₄)	0,01 %

Tablica 5. Udjeli materijala u uzorcima

Uzorak	Leteći pepeo [g]	Pijesak [g]	Na/leteći pepeo [%]	Ms = Na ₂ O/SiO ₂	Voda/leteći pepeo
Uzorak s letećim pepelom klase F i pijeskom	450	1175	14	0,2	0,35
Uzorak s letećim pepelom klase C i pijeskom	450	1175	12	0,6	0,70

2.2. Metoda

Svi uzorci geopolimera pripremljeni su u standardnoj miješalici za mort tipa Hobart. Najprije su pomiješani pijesak i leteći pepeo u suhom stanju, a zatim je dodana mješavina NaOH, Na₂SiO₃ i vode, nakon čega je sve zajedno miješano tri minute. Udjeli materijala sadržanih u geopolimerskom uzorku prikazani su u tablici 5. Ti udjeli odgovaraju količini koja je potrebna za ispunjavanje trostrukog volumena prizmatičnog kalupa dimenzija 40 x 40 x 160 mm. Metoda za određivanje konzistencije svježeg morta rasprostiranjem, opisana u normi TS EN 1015-3 [38], primijenjena je za određivanje obradljivosti geopolimernog morta.

Geopolimerne mješavine pripremljene u miješalici ulivene su u standardni kalup dimenzija 40 x 40 x 160 mm. Uzorci su uliveni u kalup nakon pripreme kalupa. Svaka grupa uzoraka pripremljena s letećim pepelom klase F i klase C sušena je u sušioniku 48 sati pri temperaturama od 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C i 100 °C. Uzorci su zatim izvađeni iz kalupa i čuvani pri sobnoj temperaturi od ± 22 °C u trajanju od 3-7-14-28-90-180-360 dana. Izmjerene su jedinične težine i brzine prolaska ultrazvučnih valova te je za svaki uzorak u skladu s normom TS EN 1250-4 [40] provedeno ispitivanje tlačne i čvrstoće na savijanje, te je određena brzina ultrazvučnih impulsa. Uz to, grupa uzoraka s letećim pepelom klase F njegovana je pri sobnoj temperaturi od ± 22 °C u vremenu od 3-7-14-28-90-180-360 dana. Nakon toga su provedena ista ispitivanja i na preostalim uzorcima. Uzorci su označeni bilježenjem klase letećeg pepela, temperature postignute u sušioniku i vremena čuvanja pri sobnoj temperaturi. Na primjer, oznaka C100-360 znači da je uzorak njegovan pri temperaturi od 100°C te da je čuvan pri sobnoj temperaturi u razdoblju od 360 dana. U proizvodnji uzoraka morta korišteni su standardni kalupi oblika prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm.

U ovom je istraživanju uočeno da je tlačna čvrstoća geopolimernog morta proizvedenog s letećim pepelom klase F veća od tlačne čvrstoće uzoraka s letećim pepelom klase C. Stoga su poduzete mjere kako bi se postigla čvrstoća koja je zabilježena kod uzoraka s letećim pepelom klase F. Iz tog razloga uzorci s letećim pepelom klase F ugrađeni su u standardne kalupe dimenzija 40 x 40 x 160 mm i zamotani u aluminijsku foliju i. Zatim su stavljeni u termoizolacijske vrećice, zatvoreni i sušeni u sušioniku. Uzorci su zaštićeni na taj način kako bi se smanjio gubitak vode tijekom sušenja (slika 4.). Čvrstoće tih uzoraka, zabilježene nakon 3 i 7 dana, uspoređene su s odgovarajućim čvrstoćama uzoraka koji su u sušioniku sušeni na uobičajen način.

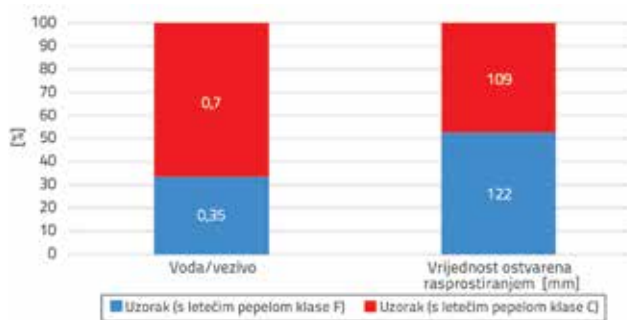


Slika 4. Uzorci u termoizolacijskim vrećicama stavljeni u sušionicu

3. Rezultati eksperimentalnog dijela

3.1. Rezultati ispitivanja konzistencije svježeg morta

Za određivanje konzistencije geopolimernog morta primjenjena je metoda za određivanje konzistencije svježeg morta (metoda rasprostiranjem) prema normi TS EN 1015-3. U usporedbi s uzorcima proizvedenima s letećim pepelom klase F, u slučaju uzoraka geopolimera proizvedenima s letećim pepelom klase C trebalo se dodavati više vode kako bi se postigla odgovarajuća obradivost, iako su ti uzorci sadržavali jednaku količinu letećeg pepela i pijeska. Nije se mogao proizvesti uzorak s letećim pepelom klase C koji bi imao vodovezivni omjer manji od 0,70. Zbog visokog udjela vapna, potrebna je veća količina vode za postizanje odgovarajuće obradivosti. Vodovezivni omjer uzoraka i rezultati pokusa rasprostiranjem prikazani su na slici 5.



Slika 5. Vodovezivni omjeri i vrijednosti rasprostiranja

Kod uzoraka izrađenim s letećim pepelom klase F zabilježeno je rasprostiranje od 122 mm pri vodovezivnom omjeru od 0,35, a kod uzoraka praiđenih s letećim pepelom klase C zabilježeno je rasprostiranje od 109 mm pri vodovezivnom omjeru od 0,70.

3.2. Rezultati ispitivanja specifične težine

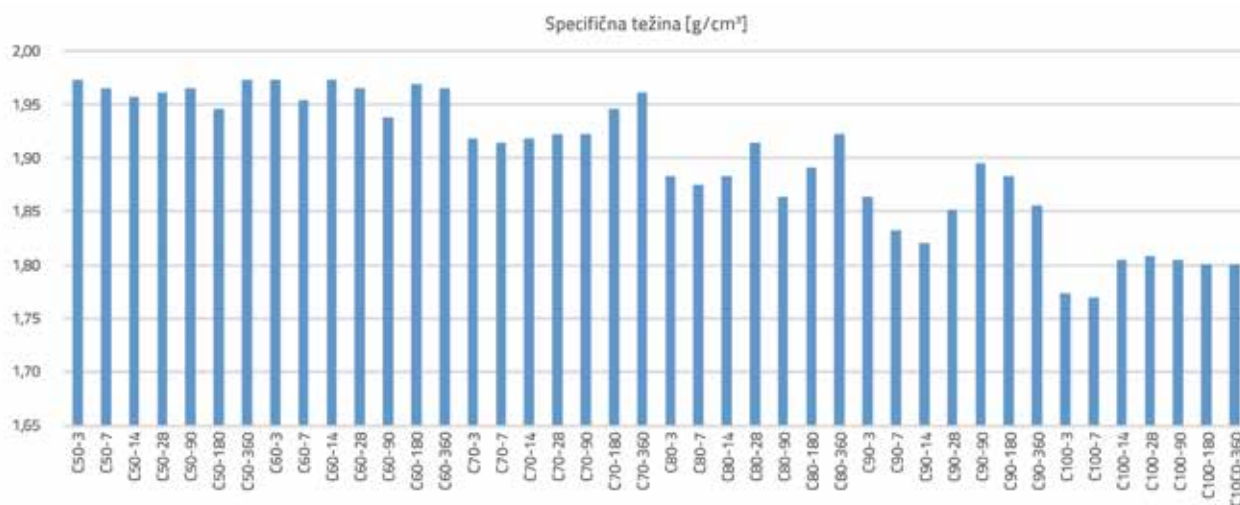
3.2.1. Rezultati ispitivanja specifične težine uzoraka geopolimera s dodatkom letećeg pepela klase C

Specifične težine uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase C variraju između 1,77 i 1,97 g/cm³. Linijski dijagram jediničnih težina uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase C prikazan je na slici 6. Specifične težine uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase C smanjuju se usporedo s povećanjem temperature njegovanja. Značajan je porast uočen kod uzoraka veće starosti nakon dužeg vremena njege u različitim

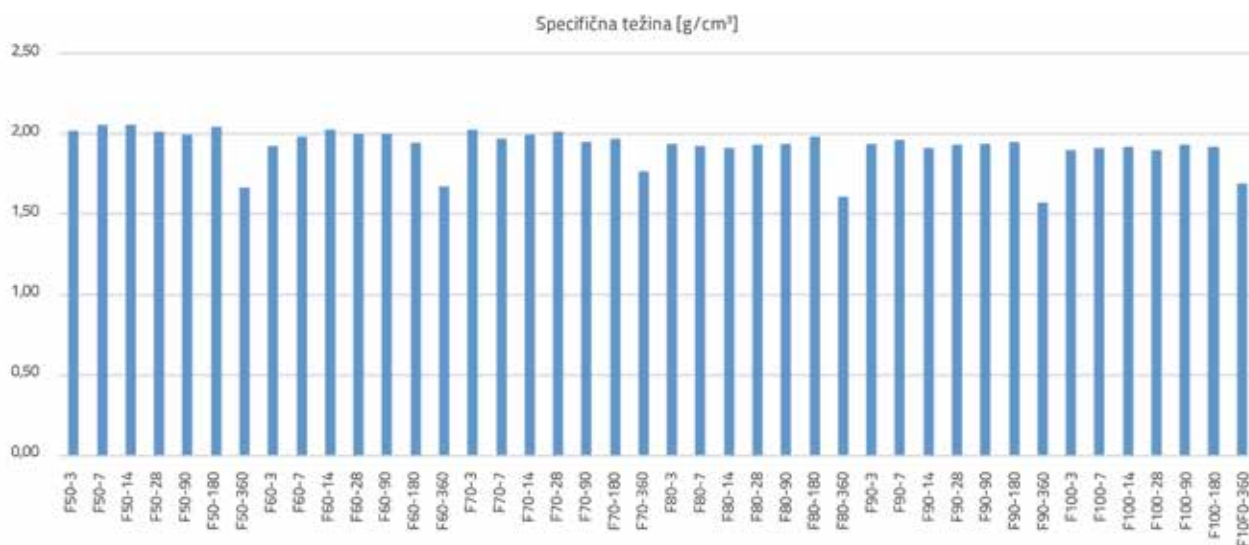
temperaturnim skupinama. Smatra se da je tome razlog zadržavanje vode pri pretjerano visokom udjelu CaO u letećem pepelu tipa C, pri čemu se CaO pretvara u kalcijev hidroksid. Osim toga, s porastom temperature specifične težine uzoraka pri ranijim starostima manje su od specifičnih težina uzoraka pri kasnijoj starosti, tj. specifična težina se s vremenom povećava. Zbog toga se smatra da kalcij prisutan u letećem pepelu klase C pretvara kalcijev hidroksid u vodu vežući vodu u laboratorijskim uvjetima.

3.2.2. Rezultati ispitivanja specifične težine uzoraka geopolimera s dodatkom letećeg pepela klase F

Specifične težine uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase F variraju između 1,57 i 2,05 g/cm³. Iako je korištena ista količina aktivatora, pijeska i pepela, ipak je zabilježeno variranje specifičnih težina uzoraka. Posebno je utvrđeno da su specifične težine uzoraka



Slika 6. Specifične težine uzoraka s letećim pepelom klase C



Slika 7. Specifične težine uzoraka s letećim pepelom klase F

nakon 360 dana niže od težina zabilježenih pri drugim starostima. Činjenica da se specifična težina uzoraka ne smanjuje sa starenjem uzoraka objašnjava se time što uzorci gube vodu uslijed sušenja. To je u skladu s nalazima iz literature prema kojima geopolimeri napuštaju medij usporedno s hlapljenjem vode zbog formiranja gela N-A-S-H, stvarajući tako šuplju strukturu [17]. Specifične težine uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase F prikazane su na slici 7.

3.3. Rezultati ispitivanja vodoupojnosti i poroznosti

3.3.1. Vodoupojnost i poroznost uzoraka s letećim pepelom klase C



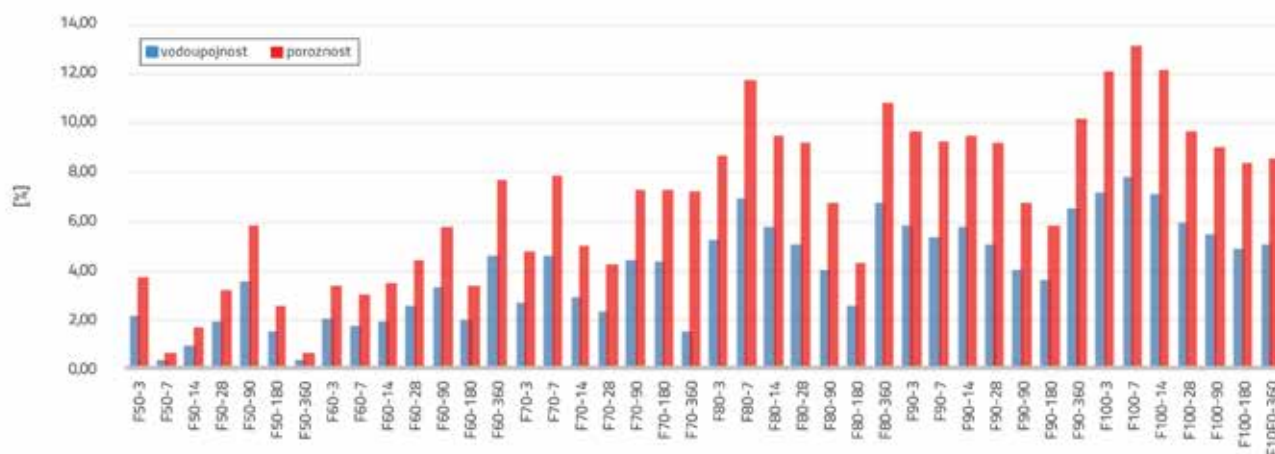
Slika 8. Deformacija uzoraka s letećim pepelom klase C

Tijekom ispitivanja vodoupojnosti provedenog u vodi, uočeno je bubrenje uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase C (slika 8.). Zbog toga se nije određivala vodoupojnost i količina šupljina. Razlog tome je visoka razina kofeina u oblaku, što sprečava geopolimernu reakciju tijekom alkalne aktivacije. Također, kada slobodno vapno u vodi reagira s vodom radi formiranja kalcijevog hidroksida, voda se upija u uzorak koji bubri čime se narušava njegova volumenska stabilnost. Bubrenje uzoraka i narušavanje stabilnosti obujma prikazano je na slici 8. Osim toga, SEM mikrografi uzoraka prikazani na slici 18. također potvrđuju navod da aktivacija nije potpuna te da ne dolazi do formiranja N-A-S-H gela.

3.3.2. Vodoupojnost i poroznost uzoraka s letećim pepelom klase F

Vrijednosti vodoupojnosti uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase F prikazane su dijagramski na slici 9.

Vodoupojnost uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase F varira od 0,39 do 6,91 %, a poroznost varira od 0,68 do 13,15 %. Utvrđeno je da vodoupojnost i poroznost uzoraka raste usporedno s porastom temperature njegovanja. Ta konstatacija vrijedi za sve temperaturne skupine uzoraka. Kako temperatura njege raste, tako raste i brzina hlapljenja vode u uzorku, te se povećavaju i vrijednosti vodoupojnosti i poroznosti. Pri nižim temperaturama, bilježi se niska stopa hlapljenja vode iz uzorka. Voda preostala u uzorku olakšava kretanja alkalnih iona u uzorcima pa su tako čestice letećeg pepela, koje nisu bile uključene u geopolimernu reakciju pri djelovanju alkalnih iona i konačnoj temperaturi njegovanja, zapravo aktivirane tijekom njegovanja u trajanju od godinu dana, što dovodi do povećanja količine proizvoda geopolimerne reakcije. Zbog formiranja proizvoda geopolimerne reakcije, ispunjavaju se šupljine i stvara se porna struktura koja upija manje vode. Odnos između povećanja temperature njegovanja i povećanja udjela pora u skladu je s podacima iz literature [17-23].

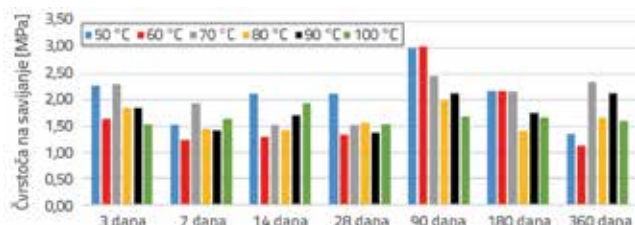


Slika 9. Poroznost i vodoupojnost uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase F [%]

3.4. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje

3.4.1. Čvrstoća na savijanje uzoraka s letećim pepelom klase C

Čvrstoća na savijanje uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase C prikazana je na slici 10.

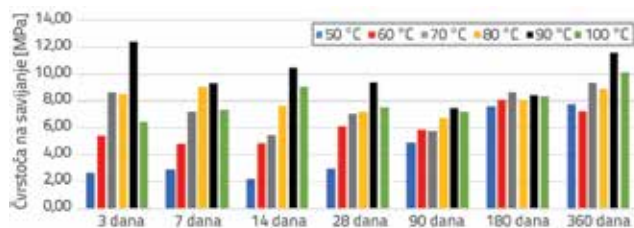


Slika 10. Čvrstoća na savijanje uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase C

Čvrstoća na savijanje uzoraka svih starosnih i temperaturnih skupina varira od 1,13 do 3,02 MPa. Najmanja čvrstoća na savijanje od 1,13 MPa zabilježena je na uzorku C60-360 koji je njegovan pri temperaturi od 60°C 48 sati nakon ugradnje u kalup, te zatim pri sobnoj temperaturi u trajanju od 360 dana. Najveća čvrstoća na savijanje od 3,02 MPa zabilježena je na uzorku C60-90 koji je njegovan pri temperaturi od 60°C 48 sati nakon ugradnje u kalup, te zatim pri sobnoj temperaturi u trajanju od 90 dana. Čvrstoća na savijanje uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase C nije značajno rasla u kasnijim starostima. Općenito se može ustvrditi da je kod svih temperaturnih skupina najveća vrijednost čvrstoće na savijanje zabilježena nakon 90 dana, osim kod uzoraka koji su njegovani pri temperaturi od 100°C. Uočeno je da čvrstoća na savijanje ostvarena na uzorcima niti bitno raste niti se bitno spušta, što ne upućuje na stabilnost. S druge strane, nakon 90 dana uočen je čak i određeni pad čvrstoće. Smatra se da je uzrok pada čvrstoće taj što u letećem pepelu klase C ne dolazi do nastanka kalcijevog hidroksida. Uočen je postupni utjecaj vlage iz zraka, zbog čega uzorci počinju bubriti narušavajući tako volumensku stabilnost očvrstnuli uzoraka.

3.4.2. Čvrstoća na savijanje uzoraka s letećim pepelom klase F

Čvrstoća na savijanje uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase F prikazana je na slici 11.



Slika 11. Čvrstoća na savijanje uzoraka proizvedenih s letećim pepelom klase F

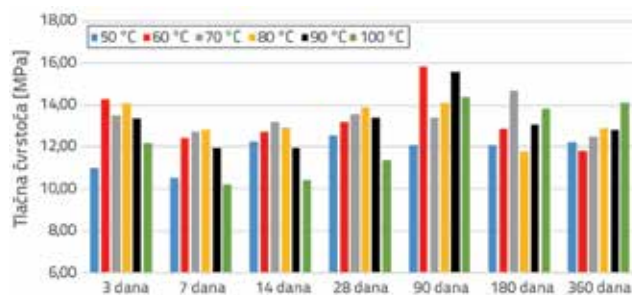
Čvrstoća na savijanje uzoraka geopolimera proizvedenih s letećim pepelom klase F varira između 2,23 i 12,42 MPa u svim razdobljima njege i u svim temperaturnim skupinama. Najmanja čvrstoća na savijanje iznosila je 2,23 MPa nakon njegovanja u trajanju od tri dana pri temperaturi od 50°C, a najveća čvrstoća na savijanje zabilježena je nakon njegovanja u trajanju od tri dana pri temperaturi od 90°C.

Čvrstoća na savijanje uzoraka njegovanih pri raznim temperaturama varirala je između 2,23 i 12,42 MPa nakon tri dana njege, tj. između 6,40 i 11,58 MPa nakon 360 dana. Čvrstoća na savijanje uzoraka njegovanih pri nižoj temperaturi povećavala se usporedno s vremenom. Razlika između čvrstoće na savijanje uzoraka njegovanih na 50°C u trajanju od 14 dana te čvrstoće na savijanje uzoraka njegovanih pri temperaturi od 90°C iznosila je 12,42 MPa, a razlika između 360-dnevnih čvrstoća iznosila je 1,31 MPa. Čvrstoća na savijanje uzoraka njegovanih pri temperaturi od 50°C povećala se za 2,81 puta u 360 dana, a čvrstoća na savijanje uzoraka njegovanih pri temperaturi od 100°C povećala je za 58,5%. Kod uzoraka njegovanih pri nižim temperaturama zabilježen je veći porast čvrstoće nego kod uzoraka njegovanih na višim temperaturama. Kao što je poznato, geopolimerna se reakcija ne odvija vrlo brzo pri sobnoj temperaturi, ali se ipak odvija. Iako kod geopolimerne reakcije pri sobnoj temperaturi i starosti do 28 dana nije zabilježen značajan porast u prvim danima, porast čvrstoće na savijanje ipak je zabilježen nakon dužeg razdoblja, tj. nakon 360 dana. S druge strane, porast vrijednosti čvrstoće još uvijek je mali i nakon dužeg vremena jer je aktivacija uzoraka njegovanih pri visokoj temperaturi uglavnom dovršena.

3.5. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

3.5.1. Tlačna čvrstoća uzoraka s letećim pepelom klase C

Tlačna čvrstoća svih uzoraka pri svim starostima i u svim temperaturnim skupinama varirala je između 10,22 i 15,83 MPa. Najmanja vrijednost tlačne čvrstoće u iznosu od 10,22 MPa postignuta je pri temperaturi od 100°C, a uzorak je njegovan pri sobnoj temperaturi 48 sati nakon 48-satne njege pri temperaturi od 60°C. Najveća vrijednost tlačne čvrstoće u iznosu od 15,83 MPa postignuta je pri temperaturi od 90°C 48 sati nakon temperaturne njege te nakon 90 dana na uzorku C60-90. Vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka s letećim pepelom klase C prikazane su na slici 12.

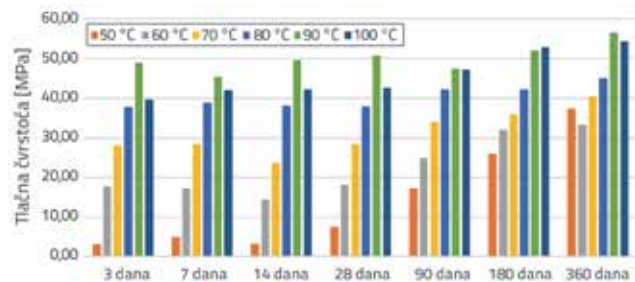


Slika 12. Tlačne čvrstoće uzoraka s letećim pepelom klase C

Tlačna čvrstoća uzoraka s letećim pepelom klase C nije se bitno povećala pri kasnijim starostima, kada je zapravo zabilježen pad čvrstoće. Općenito je kod svih temperaturnih skupina najveća vrijednost tlačne čvrstoće postignuta nakon 90 dana, osim kod uzoraka koji su njegovani pri temperaturi od 90 °C. Svi uzorci s letećim pepelom klase C položeni su u vodu u svim razdobljima starenja, te je ustanovljeno da kod letećeg pepela klase C nema alkalne aktivacije. U drugim su studijama dobivene čvrstoće od 19,40 do 23,10 MPa na uzorcima s letećim pepelom klase C [39]. Uzorci izrađeni s letećim pepelom klase C ne postižu određenu razinu tlačne čvrstoće zbog značajne količine CaO u strukturi pepela. Osim toga, gubitak sjaja u letećem pepelu klase C iznosi 6,02 %, što upućuje na prisutnost neizgorjelih čestica ugljena u letećem pepelu. Na slikama iz sljedećeg poglavlja također se može uočiti da aktivacija nije u potpunosti ostvarena. Na SEM mikrografima ne uočava se formiranje N-A-S-H gela.

3.5.2. Tlačna čvrstoća uzoraka s letećim pepelom klase F

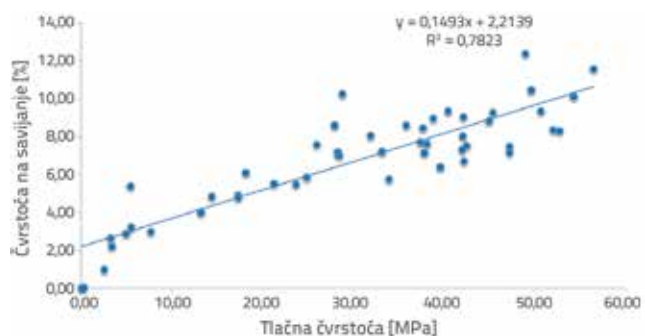
Tlačna čvrstoća uzoraka s letećim pepelom klase F prikazana je na slici 13. Tlačna čvrstoća uzoraka zabilježena pri različitim temperaturama njege varirala je od 3,21 do 48,96 MPa nakon tri dana, tj. od 28,75 do 56,44 MPa nakon 360 dana. S vremenom je rasla tlačna čvrstoća uzoraka njegovanih pri niskoj temperaturi. Kako aktivacija uzoraka njegovanih pri niskoj temperaturi nije potpuno ostvarena, čvrstoća je počela rasti tek u kasnijim razdobljima. Međutim, čvrstoća je u kasnijim razdobljima rasla sporo, jer je aktivacija uzoraka njegovanih pri visokim temperaturama bila uglavnom završena. U uzorcima s letećim pepelom klase F, visoka tlačna čvrstoća izmjerena na uzorcima koji su bili njegovani 48 sati pri temperaturi od 90 °C iznosila je 48,96 MPa. Nakon 360 dana, tlačna čvrstoća tih uzoraka porasla je na 56,44 MPa. U literaturi se može vidjeti da se visoke vrijednosti tlačne čvrstoće postižu u geopolimernim uzorcima njegovanim pri temperaturi od 95 °C u trajanju od 48 sati uz dodavanje 14 % Na [35]. U nekim se studijama navodi da se visoke vrijednosti tlačne čvrstoće alkalno aktiviranih uzoraka s letećim pepelom klase F postižu pri temperaturi od 70 °C i više [43, 44].



Slika 13. Tlačna čvrstoća uzoraka s letećim pepelom klase F

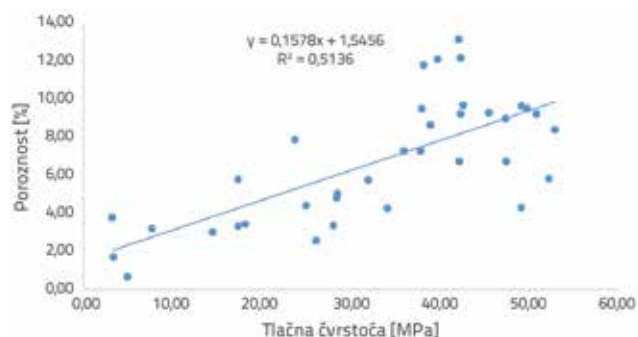
Linearna regresijska analiza provedena je kako bi se ispitao odnos između tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje geopolimernih mortova s letećim pepelom klase F. Slika 14. prikazuje odnose

i podatke koji su dobiveni regresijskom analizom. Rezultati regresijske analize pokazuju da se linearan odnos između tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje može opisati koeficijentom korelacije ($R^2 = 0,7832$) koji je vrlo značajan za tlačnu i čvrstoću na savijanje. Izračunana vrijednost R^2 pokazuje kolika se promjena u y može objasniti regresijskom linijom. Osim tog odnosa, linearna regresijska analiza provedena je kako bi se ispitao odnos između tlačne čvrstoće i poroznosti.



Slika 14. Odnos između tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje uzoraka geopolimernog morta s letećim pepelom klase F

Odnos između tlačne čvrstoće i poroznosti uzoraka s letećim pepelom klase F prikazan je na slici 15. Ovom analizom određen je korelacijski koeficijent $R^2 = 0,5136$. Ovdje taj koeficijent nije izražen zbog značajnog odnosa između čvrstoće i poroznosti. Iz toga se može vidjeti da su uzorci njegovani pri različitim temperaturama.



Slika 15. Odnos između tlačne čvrstoće i poroznosti uzoraka geopolimernog morta s letećim pepelom klase F

3.6. Rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa

3.6.1. Rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa na uzorcima s letećim pepelom klase C

Pri svim temperaturama na kojima su uzorci s letećim pepelom klase C njegovani, brzina ultrazvučnih valova varirala je pri svim starostima od 1600 do 2169 m/s. Brzina ultrazvučnog impulsa nakon 28 dana njegovanja na sobnoj temperaturi iznosila je 1600 m/s, koje je proveo nakon 48 sati njege pri temperaturi od 100 °C. Najviša brzina ultrazvučnih valova iznosila je 2169 m/s nakon tri dana čuvanja pri sobnoj temperaturi, koje je

Tablica 6. Brzina ultrazvučnog impulsa uzoraka s letećim pepelom klase C [m/s]

Temperatura Starost uzorka	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
3 dana	2076	2138	2169	2117	2123	1744
7 dana	2048	2043	2069	2039	1880	1780
14 dana	1928	2048	1969	1980	1838	1704
28 dana	2051	2110	2037	2043	1951	1600
90 dana	1937	1971	1893	1953	1944	1857
180 dana	1991	1874	1888	1602	1769	1856
360 dana	1971	2146	1894	1909	1767	1855

provedeno nakon 48 sati pri temperaturi od 70°C. Brzina ultrazvučnog impulsa za uzorke s letećim pepelom klase C prikazana je u tablici 6.

3.6.2. Rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa na uzorcima s letećim pepelom klase F

Brzina ultrazvučnog impulsa uzoraka s letećim pepelom klase F prikazana je u tablici 7. Pri svim temperaturama na kojima su uzorci s letećim pepelom klase F njegovani, brzina ultrazvučnih valova varirala je od 1930 do 2661 m/s. Brzina ultrazvučnog impulsa nakon trećeg dana njege na sobnoj temperaturi iznosila je 1930 m/s, koje je provedeno nakon 48 sati njege pri temperaturi od 50°C. Najviša brzina ultrazvučnih valova iznosila je 2661 m/s pri temperaturi od 90°C nakon 48 sati temperaturne njege i njege pri sobnoj temperaturi.

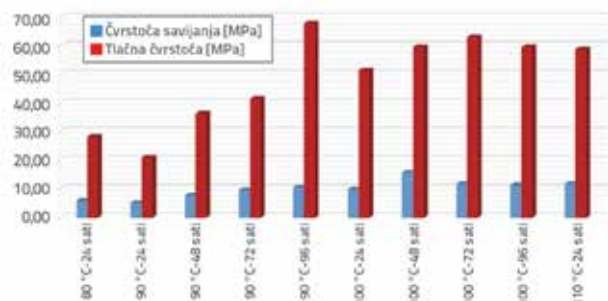
Općenito uzevši, utvrđeno je da je brzina ultrazvučnih impulsa uzoraka s letećim pepelom klase F veća od brzine prolaska ultrazvučnih valova kod uzoraka s letećim pepelom klase C. To se može objasniti time što se uzorci s letećim pepelom klase C odlikuju manjom čvrstoćom i manjom specifičnom težinom od uzoraka s letećim pepelom klase F. Osim toga, veća količina pora kod uzoraka s letećim pepelom klase C utječe na brzinu ultrazvučnih impulsa jer zvuk putuje brže kroz kruta tijela nego kroz prostor.

3.7. Utjecaj gubitka vode tijekom temperaturne njege na čvrstoću

Neki od uzoraka s letećim pepelom klase F njegovani su stavljanjem u termoizolacijske vrećice. Pritom je cilj bio spriječiti gubitak vode stavljanjem uzoraka u zatvorenu sredinu. Čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće ostvarene tijekom sušenja sa spriječenim gubitkom vode prikazane su na slici 16. Da bi se ispitao utjecaj smanjenja gubitka vode tijekom temperaturne njege uzoraka s letećim pepelom klase F, uzorci u kalupima stavljeni su u vrećice kako bi se smanjila zrakopropusnost koju omogućava kalup. Primjena metode sprečavanja brzog gubitka vode tijekom temperaturne njege uzoraka dovela je do savijanja i povećanje tlačne čvrstoće uzoraka, i to naročito pri visokim temperaturama. Kod uzoraka njegovanih u trajanju od 96 sati pri temperaturi od 90°C ostvarena je čvrstoća na savijanje u iznosu od 10,62 MPa te tlačna čvrstoća od 67,92 MPa. Smanjeni gubitak vode tijekom temperaturnog njegovanja pozitivno je utjecao na čvrstoću na savijanje i tlačnu čvrstoću. Smatra se da smanjenje gubitka vode omogućuje alkalnim ionima u uzorku lakše i brže kretanje po kružnoj putanji, pa tako jednostavno dolaze do alkalnih iona čija geopolimerska reakcija još nije dovršena. Kada se ne spriječi gubitak vode, smatra se da je spriječena reakcija alkalnih iona, te da se reakcijom ne može zahvatiti čitavo područje u uzorku u kojem dolazi do hlapljenja vode.

Tablica 7. Brzine ultrazvučnih impulsa uzoraka s letećim pepelom klase F [m/s]

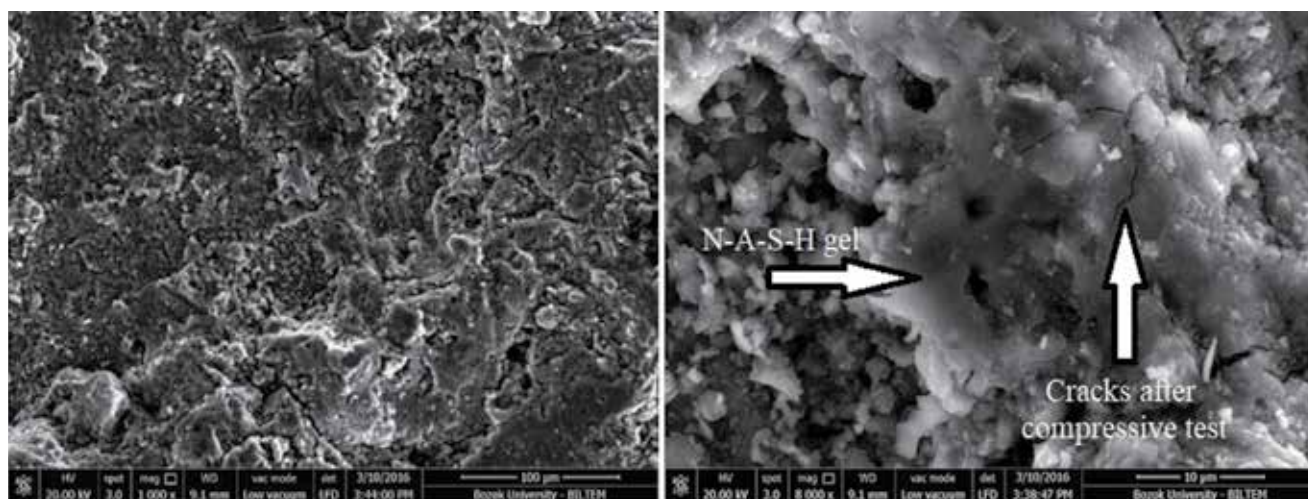
Temperatura Starost uzorka	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
3 dana	1930	2209	2521	2473	2430	2001
7 dana	2206	2283	2226	2459	2528	2054
14 dana	1981	2302	2324	2525	2564	2579
28 dana	2141	2141	2514	2504	2661	2514
90 dana	2175	2250	2408	2573	2631	2587
180 dana	2329	2342	2519	2579	2655	2650
360 dana	2500	2413	2573	2585	2651	2641



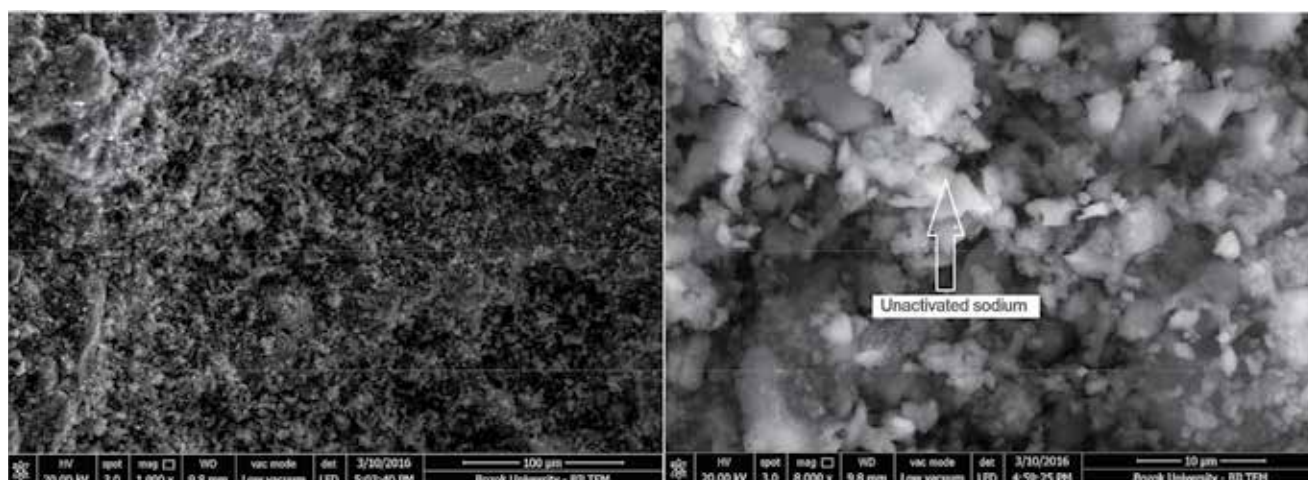
Slika 16. Utjecaj temperature njege na mehaničku čvrstoću uzoraka njegovanih u termoizolacijskim vrećicama

3.8. Mikrostruktura uzoraka

Mikrografi uzoraka s letećim pepelom klase F i C nakon 48-satne njege pri 90°C, dobiveni pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM), prikazani su na slikama 17. i 18.



Slika 17. SEM mikrografi uzorka F90



Slika 18. SEM mikrografi uzorka C90

4. Zaključak

Na temelju laboratorijskih ispitivanja dobiveni su sljedeći rezultati:

- Ispitivanjem geopolimernih mortova s letećim pepelom klase F utvrđena je izuzetno zadovoljavajuća tlačna čvrstoća (reda veličine 60 MPa) i savojna čvrstoća (reda veličine 10 MPa).
- Uočeno je da povećanje temperature na kojoj su uzorci s letećim pepelom klase F njegovani dovodi do ubrzanja geopolimerizacijske reakcije. Također je uočeno i povećanje čvrstoće mortova s letećim pepelom klase F tijekom čuvanja uzoraka u laboratorijskim uvjetima nakon provođenja temperaturnog njegovanja do dana ispitivanja. Dakle, reakcija je nastavljena i pri sobnoj temperaturi.
- Ispitivanjem geopolimernih mortova s letećim pepelom klase C utvrđena je niska tlačna čvrstoća (reda veličine 15 MPa) i čvrstoća na savijanje (reda veličine 1-3 MPa). Iako je kod mortova s letećim pepelom klase C zabilježeno povećanje čvrstoće, uočena je

njihova disperzija u vodi kada su bili uronjeni u vodu radi mjerenja vodoupojnosti. Zbog toga je odlučeno da se mortovi iz tog stupca ne mogu koristiti. SEM analizom ispitivanih uzoraka ustanovljeno je da je leteći pepeo klase F reagirao geopolimerski, što nije bio slučaj s letećim pepelom klase C.

- Učinkovitost letećeg pepela klase F puno je veća od učinkovitosti letećeg pepela klase C. Ovu tvrdnju potvrđuju rezultati provedenih ispitivanja. Sprečavanje gubitka vode tijekom temperaturnog njegovanja pozitivno je utjecalo na čvrstoću.

LITERATURA

- [1] Engin, Y.: Sustainability - Leading Role in Concrete Innovation, Turkish Ready mixed concrete association, June (2016), pp. 74-76.
- [2] The European Cement Association, 2016, Activity Report <http://www.cembureau.be>, 12.10.2017
- [3] General Directorate of Industry. Cement Sector Report, Turkey, 2015.
- [4] Galzer, B., Graber, C., Rose, C., Syrett, P., Youssef, C.: Fly Ash in Concrete, http://transparency.perkinswill.com/Content/Whitepapers/FlyAsh_WhitePaper.pdf, 05.04.2016
- [5] ASTM C618-15, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [6] Gamage, N., Liyanage, K., Setunge, S., Fragomeni, S.: Overview of different types of fly ash and their use as a building and Construction material, Proceedings of the International Conference of Structural Engineering, Construction and Management Kandy, Sri Lanka, 2011.
- [7] Heidric, C., Feuerborn, H-J., Weir, A.: Cola Combustion Producta: a Global Perspective, World of Cola Ash (WOCA) Conference, Lexington, KY, April 22-25, 2013.
- [8] Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., Rahier, H.: Characterization of Alkali Activated Kaolinitic Clay, Applied Clay Science, 75-76 (2013), pp. 120-125, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.005>
- [9] Roy, D.M.: Alkali-activated cements Opportunities and challenges. Cement and Concrete Research, 29 (1999) 2, pp. 249-254, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00093-3)
- [10] Davidovits, J.: Geopolymers and Geopolymeric New Materials, Journal of Thermal Analysis, 35 (1989) 2, pp. 429-441, <https://doi.org/10.1007/BF01904446>
- [11] Duxon, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Luckey, G.C., Palomo, A., Van Deventer, J.S.J.: Geopolymer technology: the current state of the art, Materials Science, 42 (2007), pp. 2917-2933, <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
- [12] Zhang, Z.H., Zhu, H.J., Zhou, C.H., Wang, H.: Geopolymer from Kaolin in China: An overview, Applied Clay Science, 119 (2016), pp. 31-41, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.04.023>
- [13] Soutsos, M., Boyle, A.P., Vinai, R., Hadjierakleous, A., Barnett, S.J.: Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. Construction and Building Materials, 110 (2016), pp. 355-368, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.045>
- [14] Petermann, J.C., Saeed, A., Hammons, M.I.: Alkali-Activated Geopolymers: A Literature Review, Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate Airbase Technologies Division, 2010.
- [15] Badar, M.S., Patil, K., Bernal, S.A., Provis, J.L., Erez N.: Allouche Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes, Construction and Building Materials, 61 (2014), pp. 79-89, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.015>
- [16] Khale, D., Chaudhary, C.: Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review, Journal of Materials Science, 42 (2007) 3, pp. 729-746, <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>
- [17] Rangan, B.V.: Fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GC 4, Engineering Faculty, Curtin University of Technology SF, Perth, Australia, 44 (2008).
- [18] Barbosa, V.F.F., Mackenzie, K.J.D., Thaumaturga, C.: Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials, 2 (2000), pp. 309-317, [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6)
- [19] Aydın, S.: Development of a Fiber Reinforced Composite with Alkali Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag, Dokuz Eylul University, The Graduate School of Naturel and Applied Science, Civil Engineering Department, PhD thesis, 2010.
- [20] Kantarcı, F.: Investigation Of Fire Resistance Of Geopolymer Concrete Produced From Elazığ Ferrochrome Slag By Alkali Activation Method, İnönü University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Civil Engineering, Master of Science Thesis, 2013.
- [21] Oh, J., Jun, Y., Jeong, Y.: Mechanical and microstructural dissimilarities in alkali-activation for six Class F Korean fly ashes. Construction and Building Materials, 52 (2014), pp. 396-403, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.058>
- [22] Görür, E.B.: Investigate the Strength and Durability Characteristics of Fly Ash Geopolymer Concrete with Alkaly. Erciyes University, The Graduate School of Naturel and Applied Science, Civil Engineering Department, PhD thesis, 2015.
- [23] Changming, L., Tingting, Z., Lijiu, W.: Mechanical properties and microstructure of alkali activated Pisha sandstone geopolymer composites. Construction and Building Materials, 68 (2014), pp. 233-239, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.051>
- [24] Motorwala, A., Shah, V., Kammula, R., Nannapaneni, P., Raijiwala, D.B.: Alkali activated fly-ash based geopolymer concrete. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3 (2013) 1, pp. 159-166.
- [25] Komljenovic, M., Bascarivic, Z., Bradic, V.: Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. Journal of Hazardous Materials, 181 (2010), pp. 35-42, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.064>
- [26] Chi, M., Huang, R.: Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. Construction and Building Materials, 40 (2013), pp. 291-298, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.003>
- [27] Chi, M.: Effects of modulus ratio and dosage of alkali-activated solution on the properties and micro-structural characteristics of alkali-activated fly ash mortars. Construction and Building Materials, 99 (2015), pp. 128-136, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.029>

- [28] Kaya, M.: Examination of Mechanical and Durability Properties of Various Types of Fly Ash Produced by Using Alkali Activated Mortars, Sakarya University, The Graduate School of Nature and Applied Science, Civil Engineering Department, PhD thesis, 2016.
- [29] Görhan, G., Kürklü, G.: The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, *Composites Part B: Engineering*, 58 (2014), pp. 371-377. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.082>
- [30] Arrifin, M.A.M., Bhuatta, M.A.R., Hussin, M.W., Tahir, M.M., Aaziah, N.: Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 43 (2013), pp. 80-86, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.018>
- [31] Nikolic, I., Karanovic, L., Castvan, I.J., Radmilovic, V., Mentus, S., Radmilovic, V.: Improved compressive strength of alkali activated slag upon heating. *Materials Letter*, 133 (2014), pp. 251-254, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.021>
- [32] Ma, Y., Ye, G.: The shrinkage of alkali activated fly ash. *Cement and Concrete Research*, 68 (2015), pp.75-82, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.024>
- [33] Özodabaş, A., Yılmaz, K.: Improvement of the Performance of Alkali Activated Blast Furnace Slag Mortars with Very Finely Ground Pumice, *Construction and Building Materials*, 48 (2013), pp. 26-34, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.047>
- [34] Tippayasam, C., Balyore, P., Thavorniti, P., Kamseu, E., Leonelli, C., Chindapasirt, P., Chaysuwan, D.: Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 104 (2016), pp.293-297.
- [35] Duan, P., Yan, C., Zhou, W.: Influence of partial replacement of fly ash by metakaolin on mechanical properties and micro structure of fly ash geopolymer paste exposed to sulphate attack. *Ceramic International*, 42 (2016), pp. 3504-3517, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.154>
- [36] Atiş, C.D., Gorur, E.B., Karahan, O., Bilim, C., İlkentapar, S., Luga, E.: Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration, *Construction and Building Materials*, 96 (2015), pp. 673-678, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.089>
- [37] TS EN 196-1:2005: Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
- [38] TS EN 1015-3: Methods of test for mortar for masonry- Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)
- [39] TS EN 1250-4: Concrete tests - Part 4: Determination of ultrasonic pulsed wave velocity.
- [40] TS EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry- Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
- [41] Indu, D., Elangovan, R.: Study and Manufacture of Geopolymer Concrete using Class C type Fly Ash, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 37 (2016) 6.
- [42] Wan Mastura, W.I., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I., Mustafa Al Bakri, A.M., BnHussain, M.: Effect of Curing System on Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Bricks, *Advanced Materials Research*, 626 (2013), pp. 937-941, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.937>
- [43] Atiş, C.D., İlkentapar, S., Görür, E.B., Karahan, O.: Activated Fly Ash on Mechanical Properties of the mortar with alkali Geopolim The Effect of Heat Curing Time, 9. Concrete National Congress, Antalya, Turkey, 16-18 (2015) 1, pp.1-9
- [44] İlkentapar, S., Atiş, C.D., Karahan, O., Görür, A.Ş., E.B.: Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of alkali activated class F fly ash geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 151 (2017), pp. 363-369, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.041>