

Primljen / Received: 18.9.2015.

Ispravljen / Corrected: 22.6.2016.

Prihvaćen / Accepted: 22.9.2016.

Dostupno online / Available online: 10.4.2017.

# Svojstva čvrstoće mješavina zgure/letećeg pepela aktiviranih pomoću natrijevog metasilikata

## Autori:



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Erion Luga**  
eluga@epoka.edu.al



<sup>2</sup>Prof.dr.sc. **Cengiz Duran Atis**  
cdatis@erciyes.edu.tr



<sup>2</sup>zv.prof.dr.sc. **Okan Karahan**  
okarahan@erciyes.edu.tr



<sup>2</sup>Mr.sc. **Serhan Ilkentapar**  
serhan@erciyes.edu.tr



<sup>3</sup>Doc.dr.sc. **Ela Bahsude Gorur**  
elagorur@ksu.edu.tr

<sup>1</sup> Sveučilište EPOKA, Tirana, Albanija

<sup>2</sup> Sveučilište ERCİYES, Kayseri, Turska

<sup>3</sup> Sveučilište Kahramanmaraş Sütçü İmam, Kahramanmaraş, Turska

Prethodno priopćenje

**Erion Luga, Cengiz Duran Atis, Okan Karahan, Serhan Ilkentapar, Ela Bahsude Gorur**

## Svojstva čvrstoće mješavina zgure/letećeg pepela aktiviranih pomoću natrijevog metasilikata

U radu se analizira alkalno aktiviranje mješavina morta koje sadrže mljevenu granuliranu zguru iz visokih peći i leteći pepeo, pri čemu se aktivacija odvija pomoću natrijevog metasilikata. Analiziraju se dvije serije te je izmjerena tlačna čvrstoća. Rezultati dobiveni za prvu seriju pokazuju da se tlačna čvrstoća bitno smanjuje sa smanjenjem omjera zgure i letećeg pepela. Trodnevna tlačna čvrstoća morta njegovanog pri temperaturi 100 °C donekle se povećava do omjera 60/40, ali se bitno smanjuje pri omjeru 40/60.

### Ključne riječi:

mljevena granulirana zgura iz visokih peći, leteći pepeo, geopolimer, natrijev metasilikat

Preliminary note

**Erion Luga, Cengiz Duran Atis, Okan Karahan, Serhan Ilkentapar, Ela Bahsude Gorur**

## Strength properties of slag/fly ash blends activated with sodium metasilicate

The alkali activation of mortar blends containing Ground Granulated Blast Furnace Slag and Fly Ash, with activation based on sodium metasilicate, is investigated in this study. Two series are investigated, and compressive strength is measured. The results of the first series show that the compressive strength decreases considerably with a decrease in the slag and fly ash ratio. The 3-day compressive strength of mortar cured at the temperature of 100°C increases slightly up to the ratio of 60/40, but decreases considerably at the 40/60 ratio.

### Key words:

ground-granulated blast furnace slag, fly ash, geopolymer, sodium metasilicate

Vorherige Mitteilung

**Erion Luga, Cengiz Duran Atis, Okan Karahan, Serhan Ilkentapar, Ela Bahsude Gorur**

## Eigenschaften der Festigkeit durch Natriummetasilikat aktivierter Mischungen aus Schlacke/Flugasche

In dieser Arbeit wird die Alkali-Aktivierung von Mörtelmischungen mit gemahlener granulierter Hochofenschlacke und Flugasche analysiert, wobei die Aktivierung durch Natriummetasilikat erzielt wird. Es werden zwei Serien analysiert und Werte der Druckfestigkeit gemessen. Die Resultate der ersten Serie zeigen, dass die Druckfestigkeit bei einem kleineren Verhältnis von Schlacke und Flugasche deutlich sinkt. Die dreitägige Druckfestigkeit bei einer Temperatur von 100 °C gepflegten Mörtels steigt zwar ansatzweise bis zu einem Verhältnis von 60/40, sinkt aber stark bei einem Verhältnis von 40/60.

### Schlüsselwörter:

gemahlene granulirte Hochofenschlacke, Flugasche, Geopolymer, Natriummetasilikat

## 1. Uvod

Beton je danas najčešće korišten i najznačajniji materijal u sektoru građevinarstva. Procjenjuje se da se godišnje proizvede više od deset milijardi tona betona [1]. Zbog tehnološkog razvoja i porasta potražnje za običnim betonom na bazi portlandskog cementa, portlandski je cement u današnje vrijeme najtraženiji materijal u industriji građevinarstva [2]. Smatra se da proizvodnja cementa izuzetno negativno utječe na okoliš. Cementna industrija proizvodi više od 7 % CO<sub>2</sub> koji se ispušta u okolinu, tj. nastaje jedna tona ugljičnog dioksida po svakoj toni proizvedenog cementa [1]. U tom se postupku koriste i velike količine prirodnih resursa te se utroši gotovo 2-3 posto globalne primarne energije [3].

S druge strane, kako postupati sa zgurom i letećim pepelom, ekološki je upitno [4]. Mljevena granulirana zgura iz visokih peći je nusproizvod koji se dobiva u proizvodnji sirovog željeza u visokim pećima. Ona nastaje spajanjem zemljanih sastojaka u procesu taljenja željezne rudače u visokim pećima u prisutnosti vapnenca kao sredstva za omekšavanje. Nakon što se tekuća zgura brzo ohladi, ona se pretvara u sitnozrnatu, gotovo potpuno nekristalastu staklastu formu koja je poznata pod nazivom granulirana zgura. Kada se granulirana zgura sitno samelje i poveže s portlandskim cementom, dobiva se proizvod izuzetno povoljnih vezivnih svojstava [5].

Leteći pepeo ispuštaju tvornice i termoelektre pa se količine te supstance znatno povećavaju. Stoga je postupanje s letećim pepelom postao značajan ekološki i ekonomski problem. Prije se leteći pepeo uglavnom ispuštao u atmosferu, ali se sada, prema današnjim pravilima za kontrolu razine zagađenja, leteći pepeo odvaja prije ispuštanja [6]. Pokazalo se da se alkalnom aktivacijom tih otpadnih materijala oni mogu koristiti kao pogodna zamjena za tradicionalna veziva [7]. Poznati kao geopolimeri, ta veziva nastaju kao rezultat reakcije materijala koji sadrže glinicu i silicijev dioksid s alkalnim otopinama, pri čemu se stvara aluminosilikatna struktura [8].

Davidovits naglašava važnost razvoja alternativnih veziva proizvedenih od mineralnih dodataka kao što su leteći pepeo, slijeva prašina, mljevena granulirana zgura iz visokih peći, pepeo od rižinih ljusaka i metakaolin. U tom se smislu autor uvelike zalaže za poduzimanje mjera u svrhu poboljšanja tehnologije primjene geopolimera kao zamjene za portlandski cement [9].

Betoni koji se proizvode aktiviranjem mljevene granulirane zgre iz visokih peći s alkalnom otopinom poznati su pod nazivom alkalno aktivirani betoni od zgre. Kod takvih se betona portlandski cement ne koristi kao vezivo, već se u tu svrhu koristi samo alkalno aktivirana mljevena granulirana zgura iz visokih peći [10].

Istraživači iz raznih dijelova svijeta već više od pola stoljeća istražuju razne vrste sirovina i aktivatora, isto kao i mogućnosti aktiviranja geopolimera. Oni istovremeno pokušavaju i što preciznije odrediti svojstva tih inovativnih materijala. U tom su kontekstu Atis i Bilim istraživali alkalno aktiviranje geopolimera

proizvedenih zamjenom portlandskog cementa s mljevenom granuliranom zgurom iz visokih peći, pri čemu se zamjena obavljala u raznim omjerima. Kao aktivator su koristili natrijev silikat, a mjerili su karbonizaciju te tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje mortova. Zaključili su da su se mortovi proizvedeni s vezivom koje se u potpunosti sastojalo od alkalno aktivirane mljevene granulirane zgre iz visokih peći odlikovali boljim svojstvima od onih s miješanim vezivom [11]. Istraživanja također pokazuju da se mljevena granulirana zgura iz visokih peći može aktivirati pomoću lužina kao što su natrijev hidroksid (NaOH), natrijev karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) i vodeno staklo (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>). Hidratacija alkalno aktivirane mljevene granulirane zgre iz visokih peći slična je hidratacijskom procesu normalnog portlandskog cementa, pa se u konačnici dobivaju hidratacijskih proizvodi slični C-S-H-u. Aktivacijska energija iznosi gotovo 57,6 kJ/mol. U unutarnjoj strukturi betona s alkalnoaktiviranom mljevenom granuliranom zgurom iz visokih peći može se uočiti pojava nekontinuiranih mikropukotina, što je značajno za propusnost betona. S tim u vezi danas se slijeno istražuje modeliranje mehanizma nastajanja pukotina [12, 13].

Istraživanja pokazuju da su aktivatorski moduli i koncentracije iznimno značajni za alkalnu aktivaciju mljevene granulirane zgre iz visokih peći. Bakharev i dr. izvještavaju da pri istom omjeru vode i veziva mortovi proizvedeni aktiviranjem mljevene granulirane zgre iz visokih peći pomoću natrijevog silikata imaju veću čvrstoću od mortova proizvedenih s portlandskim cementom. S druge strane, visokim modulima silicijevog dioksida kod aktivatora, smanjuje se vrijednost rane čvrstoće i vezivanja, dok se pri visokoj koncentraciji lužina povećavaju vrijednosti skupljanja kod geopolimernih mortova [14].

Opsežna istraživanja letećeg pepela provode se i u vezi s proizvodnjom geopolimera. Xie i Xi istraživali su mehanizam očvršćivanja alkalno aktiviranih mortova s letećim pepelom i niskim udjelom kalcija. Nakon 24 sata njege mortova s letećim pepelom aktiviranim pomoću vodenog stakla, uočili su početak očvršćivanja amorfnih ili niskokristalastih formacija tipa Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub> [15].

Olivia i Nikraz analizirali su razvoj tlačne čvrstoće, vodoupojnost i vodopropusnost geopolimernog betona s letećim pepelom i niskim udjelom kalcija. Ustanovili su da se geopolimerni beton dobre kvalitete može proizvesti aktiviranjem letećeg pepela s niskim udjelom kalcija, ali svakako u odgovarajućim omjerima [16]. Tho-in i dr. istraživali su svojstva geopolimernih veziva s letećim pepelom i s visokim udjelom kalcija. Zaključili su da geopolimerni betoni s letećim pepelom i s visokim udjelom kalcija imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva te da su im vrijednosti gustoće, poroznosti i tlačne čvrstoće slične odgovarajućim svojstvima tradicionalnih betona [17].

Uvjeti njege u vremenu vezivanja alkalno aktiviranog letećeg pepela imaju značajnu ulogu u razvoju mehaničkih i mikrostrukturnih svojstava. Kovalchuk i dr. proizveli su geopolimerni beton tlačne čvrstoće od 102 MPa, a to su postigli njegovanjem tog betona u vremenu od osam sati pri temperaturi od 95 °C u pokrivenom kalupu [7].

Atis i dr. istraživali su mehanička svojstva geopolimerskih mortova s alkalnoaktiviranim letećim pepelom, i to aktiviranjem letećeg pepela klase F s NaOH pri raznim koncentracijama Na, a uz temperature njege od 45 do 115 °C. Kao rezultat su dobili vrlo visoku tlačnu čvrstoću koja doseže 120 MPa, te vlačnu čvrstoću pri savijanju od 15 MPa [18].

U brojnim se radovima razmatra alkalno aktiviranje mješavina zgre i letećeg pepela. Shi i Day analizirali su hidrataciju i razvoj čvrstoće aktiviranih mortova koji su sadržavali 50 % zgre i 50 % letećeg pepela aktiviranih pomoću natrijevog hidroksida i natrijevog silikata za obje kategorije letećeg pepela. Ustanovili su da utjecaj vrste letećeg pepela nije značajan, te da natrijev silikat povećava čvrstoću, dok se maksimalna čvrstoća postiže kod mortova sa zgurom koji su aktivirani pomoću Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> [19].

Puertas i dr. istraživali su razvoj čvrstoće i proizvode hidratacije za geopolimere s letećim pepelom / zgurom koji su bili aktivirani pomoću 2M i 10M otopine NaOH njegovane pri 25 °C i 65 °C. Prema njihovim rezultatima, omjer letećeg pepela / zgre i koncentracija aktivatora najvažniji su faktori za razvoj čvrstoće, a utjecaj temperature njege niži je u usporedbi s dva prethodna faktora [4].

Zhao i dr. navode da omjer letećeg pepela / zgre ima značajnu ulogu u svojstvima čvrstoće mortova s letećim pepelom / zgurom koji su aktivirani pomoću lužina. Primjena letećeg pepela u pravilnim omjerima može dovesti do smanjenja troškova, a da se pritom ne naruše svojstva čvrstoće [20].

Mnogi istraživači bave se analizom veziva sastavljenih od zgre i letećeg pepela kako bi na taj način omogućili izradu novih geopolimerskih veziva. U tom smislu provode se brojna ispitivanja kako bi se utvrdile mogućnosti njihovog zajedničkog korištenja u istom veznom sustavu, te da bi se utvrdio optimalan omjer tih dviju komponenata [21].

U ovom radu analiziran je utjecaj udjela granulirane zgre / letećeg pepela na svojstva čvrstoće i razvoja čvrstoće mješavina zgre / letećeg pepela aktiviranih pomoću natrijevog metasilikata njegovanih pri sobnoj temperaturi i temperaturi od 100 °C.

## 2. Svojstva materijala

### Mljevena granulirana zgra iz visokih peći (GGBFS)

Zgura GGBFS dobivena je iz čeličane Iskenderun koja se nalazi u južnom dijelu Turske. Kemijski sastav prikazan je u tablici 1. Specifična gustoća GBFS-a iznosila je 2,81 g/cm<sup>3</sup>. Zgura iz visokih peći mljevena je i granulirana u cementari Iskenderun do Blaineove specifične površine od približno 4250 cm<sup>2</sup>/g. GGBFS ubraja se u zgre klase 80 prema indeksu hidrauličke aktivnosti koji je definiran u normi ASTM C989 [22].

### Leteći pepeo (FA)

Za ispitivanja u ovom radu upotrijebljen je leteći pepeo klase F iz termoelektrane Sugoza koja se nalazi na području Yumurtalik-Adana u južnoj Turskoj. Kemijska svojstva letećeg pepela prikazana su u tablici 1. Prema standardnim granicama iskazanima u normama EN 450-1 [23] i ASTM C618-94a [24],

vrijednost SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veća je od 70 %, a udio CaO manji je od 10 %. Stoga ovaj FA ulazi u klasu letećeg pepela "F" (nizak udio vapna). Specifična gustoća korištenog FA iznosi 2,39 g/cm<sup>3</sup>, a Blaineova specifična površina iznosi 2900 cm<sup>2</sup>/g. Indeks pucolanske čvrstoće određen prema normi ASTM C 618 [24] iznosi 78 nakon 28 dana.

Tablica 1. Kemijski sastav za GGBFS i FA [%]

Oksid	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI
GGBFS	36,7	5,20	0,98	32,61	10,12	0,99	0,76	0,42	2,88
FA	61,81	19,54	7,01	1,77	2,56	0,31	0,99	2,43	2,20

### Alkalni aktivator

Natrijev metasilikat, koji u ovom ispitivanju služi kao alkalni aktivator za aktivaciju mljevene granulirane zgre iz visokih peći i letećeg pepela, dobiven je od tvrtke Silmaco Silicates. Modul natrijevog metasilikata SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O iznosi 1.

### Pijesak

Za pripremanje uzoraka morta upotrijebljen je pijesak Rilem-Cembureau Standart. Granulometrijski sastav pijeska prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Granulometrijski sastav pijeska

Veličina sita [mm]	2	1,6	1	0,5	0,16	0,08
Kumulativni postotak	0	7	33	67	87	99

## 3. Eksperimentalni dio

### 3.1. Priprema mješavina za uzorke

U radu se analiziraju alkalno aktivirani mortovi s dodatkom smjese GGBFS/FA. U skladu s normom TS-EN196-1 [25], u pripremanju tih mortova korišten je pijesak RILEM, GGBFS i/ili FA, voda i natrijev metasilikat. Omjer vode i veziva je dobro poznat čimbenik koji utječe na svojstva morta. Da bi se utvrdio utjecaj omjera vode i veziva te kako taj omjer utječe na svojstva mješavina zgre/letećeg pepela aktiviranih mortovima s natrijevim metasilikatom, nije predmet ovog istraživanja, pa ni navedeni čimbenik nije analiziran u eksperimentalnom dijelu. Omjer vode i veziva je konstantna vrijednost od 0,5, u skladu s normom TS-EN196-1 [25]. Prema istoj normi usvojena je i konstantna vrijednost od 450 g za vezivo GGBFS+FA. Uzorci mortova su njegovani pri različitim temperaturama u dvije serije. U svim mješavinama količina natrija bila je konstantna (6 % od GGBFS+FA). Šestpostotna vrijednost preuzeta je iz literature jer osigurava odgovarajuću tlačnu čvrstoću [26, 27, 28]. U svom istraživanju, Bilim i dr. te Atis i dr. objasnili su da se optimalni rezultati dobivaju s mješavinama pripremljenima pri molarnom odnosu koji je iznosio 1. Oni su također naglasili da iako šestpostotni odnos natrija nije optimalan s obzirom na

dobivena svojstva, to je optimalni odnos sa stajališta čvrstoća / cijena [27, 28]. Spomenuti šestpostotni odnos natrija pretvoren je u približno 8 % za omjer  $\text{Na}_2\text{O}$  prema krutoj fazi, te je prihvaćen kao odnos prikladan za ovo istraživanje.

U prvoj seriji s uobičajenom njegom (NC), uzorci su njegovani pri sobnoj temperaturi uz relativnu vlažnost zraka 95 %, a u drugoj seriji s toplinskom njegom (HC) uzorci su njegovani pri temperaturi od 100 °C. Projektiranje sastava mješavina je pojednostavnjeno, pa je 20 % mase GGBFS-a zamijenjeno letećim pepelom (FA) kako bi se postigao optimalan odnos za oba uvjeta njege. Sastav pojedinih mješavina morta prikazan je u tablici 3. U ovom je radu za alkalno aktiviranje primijenjena ekonomična metoda njege (sušionik pri 100 °C) jer visokosofisticirani uređaj i autoklavni sustav potreban za njegu u zatvorenim uvjetima (bez gubitka vode) i pri visokoj temperaturi nisu bili dostupni.

Tablica 3. Sastav pojedinih mješavina morta

Broj mješavine	Odnos vode i veziva	Vezivo [g]	GGBFS [%]	FA [%]	Pijesak [g]
1	0,5	450	100	0	1350
2	0,5	450	80	20	1350
3	0,5	450	60	40	1350
4	0,5	450	40	60	1350
5	0,5	450	20	80	1350
6	0,5	450	0	100	1350

### 3.2. Priprema uzoraka

Mješavine su pripravljene prema sastavu prikazanom u tablici 3. Postupak pripreme je unaprijed određen i pri pripremi mješavina korištena je miješalica Hobart. Miješalica Hobart omogućava rad na 140 i 285 okretaja u minuti, što je u skladu s normom TS-EN196-1 [25]. Primjenom elektroničkog uređaja, miješalica može raditi u automatskom postupku koji je u skladu s normom TS-EN196-1 [25]. U staklenoj posudi najprije se pomiješa voda s natrijevim metasilikatom do potpunog otapanja da bi se dobila homogena smjesa koja omogućuje jednostavnije raspršivanje  $\text{SiO}_2$  i  $\text{NaO}_2$  u mortu. Zatim se, kad miješalica radi sporije, dodaje otopina i 450 g veziva i sve se miješa 30 sekundi. U drugom koraku, dok miješalica radi sporije, dodaje se polako pijesak i miješanje se nastavlja 30 sekundi. U trećem koraku miješanje se nastavlja uz brži način rada dodatnih 30 sekundi. U četvrtom koraku miješanje se zaustavlja na 15 sekundi. Nakon mirovanja, miješanje se bržim radom miješalice nastavlja 60 sekundi. Uzorci se ugrađuju u prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm. Pri završetku pripreme morta, svježi mort se ugrađuje u kalupe odgovarajućom žlicom u dva sloja te se uzorak vibrira na vibrostolu brzinom od 60 udara u jednoj minuti. Nakon vibriranja površina uzorka se završno obrađuje. Uzorci iz prve serije vade se iz kalupa nakon 24 sata te se njeguju u vodi pri temperaturi od  $21 \pm 1$  °C tijekom 3, 7 i 28 dana. Nakon ugradnje u kalupe, uzorci iz druge serije odmah se stavljaju u sušionik gdje se suše

na temperaturi 100 °C tijekom 24, 48 i 72 sata. Nakon razdoblja njege, uzorci se ispituju kako bi se odredila njihova tlačna čvrstoća.

### 3.3. Određivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća uzoraka određena je u skladu s normom TS-EN196-1 [25]. Za ispitivanje tlačne čvrstoće korišteni su uzorci veličine 40 x 40 x 160 mm. Brzina nanošenja opterećenja iznosila je 500 N/s. Dimenzije zone nanošenja opterećenja iznosile su 40 x 40 mm. Na slici 1. prikazan je uređaj za ispitivanje i uređaj za određivanje tlačne čvrstoće uzoraka. Kako raste udio letećeg pepela, tako su i uzorci tamnije boje.



Slika 1. Ispitivanje tlačne čvrstoće

### 4. Rezultati i rasprava

Rezultati ispitivanja prikazanog na slici 1. pokazuju porast tlačne čvrstoće morta za njegu pri sobnoj temperaturi. Grafički prikaz sa svojstvima morta nakon 3, 7 i 28 dana (slika 2.) pokazuje da tlačna čvrstoća pada usporedo sa smanjenjem omjera zgre i letećeg pepela.



Slika 2. Promjena vrijednosti tlačne čvrstoće ovisno o odnosu zgre i letećeg pepela, za njegu pri sobnoj temperaturi

Sve to dokazuje da je omjer zgre i letećeg pepela značajan čimbenik za aktiviranje morta koji sadrže mješavinu zgre i

Tablica 4. Postoci oksida za svaki odnos zgre i letećeg pepela

Zgura / leteći pepeo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28 dana NC [MPa]	72 sata HC [MPa]
100/0	36,7	5,2	32,6	0,42	7,1	0,89	0,78	74,8	42,7
80/20	41,7	8,1	26,4	0,82	5,2	0,63	0,53	57,6	45,7
60/40	46,7	10,9	20,3	1,22	4,3	0,43	0,35	39,3	46,6
40/60	51,8	13,8	14,1	1,63	3,8	0,27	0,22	18,2	12,1
20/80	56,8	16,7	7,9	2,03	3,4	0,14	0,11	8,4	13,7
0/100	61,8	19,5	1,77	2,43	3,2	0,03	0,02	3,1	15,4
			0,9665		0,9206	0,9879	0,9844	R <sup>2</sup>	
			0,688		0,5163	0,6552	0,6367		R <sup>2</sup>

NC = normal-cured (mortovi njegovani pri sobnoj temperaturi), HC = heat-cured (mortovi njegovani pri 100 °C)

letećeg pepela [4] Mortovi proizvedeni sa stopostotnim udjelom letećeg pepela pokazuju iznimno nisku razinu aktivacije. Nakon 28 dana njege na sobnoj temperaturi, najviša vrijednost tlačne čvrstoće iznosila je 74,8 MPa za mješavinu NC1, tj. mješavinu čiji je omjer zgre i letećeg pepela 100/0.

Analizirana je promjena vrijednosti tlačne čvrstoće alkalno aktiviranih mortova njegovanih na sobnoj temperaturi u odnosu na trajanje njege. Ustanovljeno je da tlačna čvrstoća svih mortova raste s trajanjem njege. Međutim, nagib i vrijednosti su veće kada je omjer zgre i letećeg pepela veći. Zabilježena je niska geopolimerska reakcija letećeg pepela pri sobnoj temperaturi. S druge strane, rezultati ispitivanja pokazuju da se granulirana zgura može pri sobnoj temperaturi aktivirati alkalnim medijem [19]. Prijašnjim su istraživanjima dobiveni slični rezultati za alkalno aktivirane sustave letećeg pepela klase F. Aktivacijske reakcije nisu dovoljno brze da bi se pri sobnoj temperaturi proizvela pasta visoke čvrstoće. Da bi se reakcije ubrzale, potrebne su više temperature [15].



Slika 3. Utjecaj trajanja toplinske njege na tlačnu čvrstoću prema odnosu zgre/letećeg pepela, za njegu pri temperaturi 100 °C

Rezultati ispitivanja prikazani na slici 3. pokazuju utjecaj trajanja njege pri temperaturi 100 °C na tlačnu čvrstoću mortova. Svojstva morta za njegu pri temperaturi 100 °C nakon 24, 48 i 72 sata, prikazana na dijagramu, potvrđuju da je trend promjene tlačne čvrstoće u ovisnosti o odnosu GGBFS/FA bitno različit od

trenda zabilježenog za uzorke njegovane pri sobnoj temperaturi. Međutim, može se u svakom slučaju uočiti da je odnos GGBFS/FA iznimno važan čimbenik za svojstvo tlačne čvrstoće morta. Kada količina letećeg pepela prekorači vrijednost od 60 % u mješavini letećeg pepela i zgre, to znatno utječe na vrijednost tlačne čvrstoće koja se naglo smanjuje.

Kao što se može vidjeti na dijagramu, vrijednosti tlačne čvrstoće kod svih se omjera zgre i letećeg pepela ne mijenjaju bitno nakon prva 24 sata, što pokazuje da vrijeme od 24 sata nije dovoljno za njegu.

Dijagram prikazan na slici 3. prikazuje da se vrijednosti tlačne čvrstoće mijenjaju u malom rasponu od 40,5 do 46,6 MPa kada je omjer zgre i letećeg pepela jednak ili veći od 60/40.

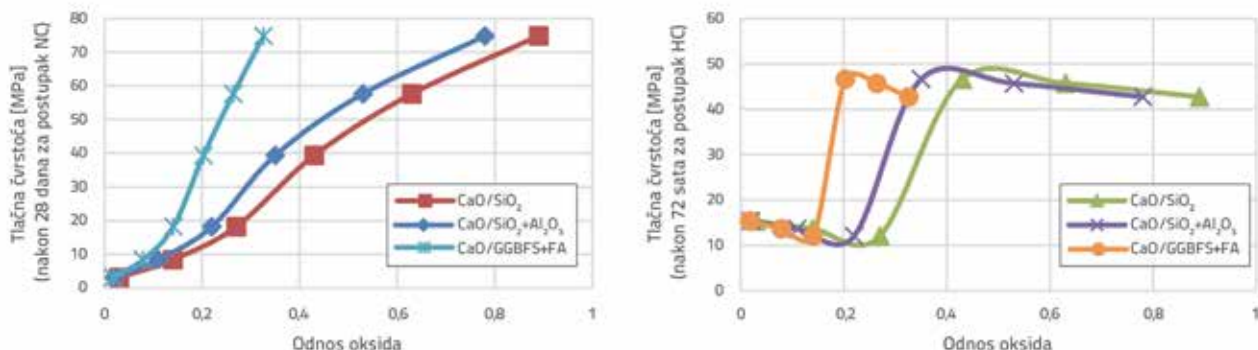
Kada omjer zgre i letećeg pepela padne ispod 40/60, tada se vrijednosti tlačne čvrstoće svih mortova bitno smanjuju, ali ostaju u malom rasponu i variraju od 10,2 do 15,4 MPa.

Istraživanja pokazuju da se u aktiviranim smjesama zgre i letećeg pepela formiraju dvije različite vrste gel struktura: C-A-S-H, koja se uglavnom sastoji od alkalno aktivirane zgre, i N-A-S-H, koja se uglavnom formira u sustavima letećeg pepela [29]. Povećanje količine letećeg pepela u mješavini povoljno utječe na tlačnu čvrstoću do udjela zgre i letećeg pepela od 60/40 ako se njega izvodi na temperaturi 100 °C (HC). Međutim, to povećanje negativno utječe ako količina letećeg pepela iznosi više od 60 % u smjesi zgre i letećeg pepela, i to u oba slučaja njege (NC i HC) [20].

To se događa zato što su u alkalno aktiviranim sustavima letećeg pepela potrebne veće koncentracije aktivatora [18].

Kada se usporede maksimalne vrijednosti tlačne čvrstoće postignute za svaki od dva analizirana slučaja (uvjeta) njege, može se zaključiti da se kod uzoraka s uobičajenom njegovom postižu više vrijednosti nego kod toplinski njegovanih uzoraka i to na kraju odgovarajućeg razdoblja njege. Razlog takvoj situaciji je isparavanje vode potrebne za hidratacijski proces paste, pa stoga reakcija završava unutar 24 sata.

Tablica 4. pokazuje promjenu nekih od najznačajnijih postotaka oksida u vezi s odnosom zgre i letećeg pepela, isto kao promjenu odnosa tih oksida. Zadnja dva stupca pokazuju



Slika 4. Veza između odnosa oksida i tlačne čvrstoće za uzorke njegovane metodom NC (normal-cured) i HC (heat-cured)

odgovarajuće prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće za svaki omjer zgre i letećeg pepela za obje metode njege. Gornje korelacije dobivaju se kada se udio oksida u mješavini usporedi s vrijednostima tlačne čvrstoće za obje metode njege. Može se vidjeti da je porast čvrstoće uobičajeno njegovanih mortova (NC) bitno povezan s udjelom CaO [30] i s njegovim odnosom sa SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Međutim, takva korelacija nije uočena kod mortova njegovanih pri temperaturi 100 °C (HC) zbog temperaturnog faktora.

Na slici 4. također vidimo vezu između međusobnih odnosa nekih od glavnih oksida (kao što su CaO/SiO<sub>2</sub>, CaO/SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) i ukupne mješavine CaO/GGBFS+FA za svaki omjer između zgre i letećeg pepela, uključujući i tlačne čvrstoće uzoraka za obje metode njege. Na prvom dijagramu se vidi veza između odnosa oksida i tlačne čvrstoće uobičajeno njegovanih uzoraka nakon 28 dana, a na drugom dijagramu vidi se veza odnosa oksida prema tlačnoj čvrstoći uzoraka njegovanih pri temperaturi 100 °C nakon 72 sata. Oba dijagrama su vizualni prikaz podataka iskazanih u tablici 4.

## 5. Zaključci

U ovom se radu analizira alkalna aktivacija mortova koji sadrže mješavinu zgre i letećeg pepela, a aktiviraju se pomoću natrijevog metasilikata. Iz dobivenih rezultata ispitivanja mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Omjer zgre i letećeg pepela značajan je čimbenik u procesu alkalne aktivacije mortova koji sadrže zgru i leteći pepeo, a aktivirani su pomoću natrijevog metasilikata.
- Tlačna čvrstoća alkalnoaktiviranih mortova njegovanih na sobnoj temperaturi kontinuirano se smanjuje s porastom količine letećeg pepela.
- Visokovrijedni geopolimerski mort tlačne čvrstoće otprilike 75 MPa nakon 28 dana može se dobiti aktiviranjem mješavine zgre i letećeg pepela pomoću natrijevog metasilikata njegovanog pri sobnoj temperaturi.
- Tlačna čvrstoća geopolimerske smjese neznatno se povećava s povećanjem trajanja njege pri temperaturi 100 °C, u odnosu na kraće trajanje njege. Međutim, tlačna čvrstoća od 40 MPa postiže se nakon njege od 24 sata pri temperaturi od 100 °C za mortove koji sadrže zgru i leteći pepeo u omjerima 100/0, 80/20 i 60/40.
- Utvrđeno je da udio od 40 % letećeg pepela u mortovima s mješavinom zgre i letećeg pepela njegovanih pri 100 °C može dovesti do smanjenja troškova pripreme, a da se ne smanji čvrstoća morta. Postupci njege NC 4, 5, 6 i HC 4, 5, 6 mogu korisno poslužiti za proizvodnju zidanih blokova.
- Primjena zgre i letećeg pepela u istoj mješavini nije se pokazala posebno korisnom.
- Za aktivirane mortove s dodatkom granulirane zgre uobičajena je njega povoljnija od njege pri temperaturi 100 °C.

## LITERATURA

- [1] Meyer, C.: The Greening Of The Concrete Industry, *Cement, Concrete Composites*, 31 (2009), pp. 601-605, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>
- [2] Criado, M., Palomo, A., Fernandes-Jimenez, A.: Alkali Activation Of Fly Ashes. Part 1: Effect Of Curing Conditions On The Carbonation Of The Reaction Products, *FUEL*, 84 (2005), pp. 2048-2054, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030>
- [3] Juenger, M., Winnefeld, F., Provis, J., Ideker, J.: Advances In Alternative Cementitious Binders, *Cement, Concrete Research*, 41 (2011), pp. 1232-1243, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>
- [4] Puertas, F., Martinez-Ramirez, S., Alonso, S., Vazquez T.: Alkali-Activated Fly Ash/Slag Cement Strength Behaviour, Hydration Products, *Cement, Concrete Research*, 30 (2000), pp. 1625-1632, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00298-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00298-2)
- [5] Erdoğan, T.Y.: *Admixtures for Concrete*, Ankara: METU Press Publishing Company, 1997.
- [6] Al-Zboona, K., Al-Harashsheh, M.S., Hania, F.B.: Fly ash-based geopolymer for Pb removal from aqueous solution, *Journal of Hazardous Materials*, 188 (2011), pp. 414-421, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.133>

- [7] Kovalchuk, G., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.: Review, Alkali-Aktivated Fly Ash: Effect Of Thermal Curing Conditions On Mechanical, Microstructural Development-Part II, *FUEL*, 86 (2007), pp. 315-322, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>
- [8] Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P.: Compressive Strength, Modulus Of Elasticity,, Water Permeability, Of Inorganic Polyper Concrete., *Materials, Design*, 31 (2010), pp. 4748-4754, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.012>
- [9] Davidovits, J.: High-Alkali Cements For 21<sup>st</sup> Century Concretes. In Concrete Technology, Past, Present, Future, *Metha, P.K, Ed., in V. Mohan Malhotra Symposium*, Detroit, 1994.
- [10] Collins, F., Sanjayan, J.: Microcracking, Strength Development of Alkali Activated Slag Concrete, *Cement, Concrete Composites*, 23 (2001), pp. 345-352, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00003-8)
- [11] Bilim, C., Atiş, C.D.: Alkali Activation Of Mortars Containing Different Replacement Levels Of Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Construction, Building Materials*, 28 (2012), pp. 708-712, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.018>
- [12] Zhou, Z., Wu, X., Xu, Z., Tang, M.: Kinetic Study on Hydration of Alkali-Activated Slag, *Cement, Concrete Research*, 23 (1993), pp. 1253-1258, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90062-E](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90062-E)
- [13] Collins, F., Sanjayan, J.G.: Effect of Pore Size Distribution on Drying Shrinkage of Alkali Activated Slag Concrete, *Cement, Concrete Research*, 30 (2000), pp. 1401-1406, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00327-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00327-6)
- [14] Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B.: Alkali Activation of Australian Slag Cements, *Cement, Concrete Research*, 29 (1999), pp. 113-120, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00170-7)
- [15] Xie, Z., Xi, Y.: Hardening Mechanisms Of An Alkaline-Activated Class F Fly Ash, *Cement, Concrete Research*, 31 (2001), pp. 1245-1249, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00571-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00571-3)
- [16] Olivia, M., Nikraz, H.R.: Strength, Water Penetrability of Fly Ash, *ARPN Journal of Engineering, Applied Sciences*, 6 (2011), pp. 70-78.
- [17] Tho-in, T., Sata, V., Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C.: Pervious High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete, *Construction, Building Materials*, 30 (2012), pp. 366-371, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.028>
- [18] Atis, C., Görür, E., Karahan, O., Bilim, C., Ilkentapar, S., Luga, E.: Very High Strength (120 MPa) Class F Fly Ash Geopolymer Mortar Activated At Different NaOH Amount, Heat Curing Temperature, Heat Curing Duration, *Construction, Building Materials*, 96 (2015), pp. 673-678, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.089>
- [19] Shi, C., Day, R.L.: Early Strength Development, Hydration of Blast Furnace Slag/Fly Ash Blends, *Advances in Cement Research*, 11 (1999), pp. 189-196, <https://doi.org/10.1680/adcr.1999.11.4.189>
- [20] Zhao, F.Q., Ni, W., Wang, H.J., Liu, H.J.: Activated Fly Ash/Slag Blended Cement, *Resources Conservation/Recycling*, 52 (2007), pp. 303-313, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.04.002>
- [21] Provis, J.L., Myers, R.J., White, C.E., Rose, V., Deventer, J.S.: X-Ray Microtomography Shows Pore Structure, Tortuosity In Alkali-Activated Binders, Cement, Concrete Research, 42 (2012), pp. 855-864, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.004>
- [22] ASTM-C989: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete, Mortars, Pennsylvania: *Annual Book of ASTM Standards*, 2014.
- [23] EN450-1: Fly Ash For Concrete – Part 1: Definitions, Specifications, Conformity Criteria, Brussels: *European Committee for Standardization*, 2012.
- [24] ASTM-C618-94a: Standard Specification for Coal, Fly Ash, Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02, Concrete, Aggregates,, Philadelphia: American Society for Testing, Materials, 1997
- [25] TS-EN196-1: Methods of Testing Cement – Part 1: Strength Determination, Ankara: *TSE-Turkish Standards Institution*, 2009.
- [26] Al-Otaibi, S.: Durability Of Concrete Incorporating GGBS Activated By Water-Glass, *Construction, Building Materials*, 22 (2008), pp. 2059-2067, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.023>
- [27] Bilim, C., Karahan, O., Atis, C.D., Ilkentapar, S.: Effects of chemical admixtures, curing conditions on some properties of alkali-activated cementless slag mixtures, *KSCE Journal Of Civil Engineering*, 19 (2015), pp. 733-741, <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0629-0>
- [28] Atis, C.D., Bilim, C., Celik, O., Karahan, O.: Influence of activator on the strength, drying shrinkage of alkali-activated slag mortar, *Construction, Building Materials*, 23 (2009), pp. 548-555, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.011>
- [29] Bernal, S.A., Provis, J.L., Walklay, B., San Nicolas, R., Gehman, J.D., Brice, D.G., Kilcullen, A.R., Duxson, P., van Deventer, J.S.J.: Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag, fly ash,, effects of accelerated carbonation. *Cement, Concrete Research*, 53 (2013), pp. 127-144, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.007>
- [30] Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J., Lukey, G.C.: The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers, *Materials Letters*, 57 (2003), pp. 1272-1280, [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00971-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00971-0)