

**Dr Jelena Bijeljić<sup>1</sup>**  
**Dr Nenad Ristić<sup>2</sup>**

## **UTICAJ INDUSTRIJSKIH NUSPROIZVODA NA SVOJSTVA GEOPOLIMERNIH KOMPOZITA NA BAZI ELEKTROFILTERSKOG PEPELA**

0352-2733, 55 (2023), p. 1-44  
doi: 10.5937/GK23055001B

UDK: 691.332-037.52  
66.017/.018  
ORIGINALNI NAUČNI RAD

### **Rezime**

Geopolimeri su materijali koje čine lanaci molekula nastalih polimerizacijom geopolimernih veziva. Definišu se kao čvrsti i stabilni aluminosilikatni materijali, a kao polazne sirovine za njihovu pripremu često se koriste otpadni materijali poput industrijskih nusproizvoda i alkalni rastvori u tečnom stanju. U ovom radu dati su rezultati ispitivanja fizičko–mehaničkih, mikroskopskih karakteristika i trajnost maltera i betona na bazi elektrofilterskog pepela. Izrađeno je 24 malterskih mešavina i 8 betonskih mešavina u kojima je izvršena delimična zamena elektrofilterskog pepela drugim industrijskim nusproizvodima (konvertorskom zgurom, pepelom iz drvene biomase, crvenim muljem, i otpadnim staklom) u iznosu od 5 % – 100 % sa različitim korakom zamene u odnosu na masu veziva. Uzorci geopolimernog maltera i betona su do vremena ispitivanja negovani u ambijentalnim uslovima.

Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da je moguće primenjivati elektrofilterski pepeo i druge industrijske nusproizvode za spravljanje geopolimernih maltera i betona. Ispitivane geopolimerne malterske i betonske mešavine pokazale su svojstva svojstva konstruktivnih materijala kao i da oni u pogledu ispitivanih karakteristika mogu biti adekvatna zamena tradicionalnim malterskim i betonskim mešavinama.

**Ključne reči:** geopolimeri, industrijski nusproizvodi, elektrofilterski pepeo, malter, beton

---

<sup>1</sup> Akademija tehničko-vaspitačkih strukovnih studija Niš, Aleksandra Medvedeva 20

<sup>2</sup> Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, Aleksandra Medvedeva 14

# THE INFLUENCE OF INDUSTRIAL BY PRODUCTS ON THE PROPERTIES OF FLY ASH BASED GEOPOLIMER COMPOSITES

## Summary

Geopolymers are materials made of chain molecules incurred by polymerization of geopolymer binders. Geopolymers are defined as a solid and stable aluminosilicate materials, made of industrial byproducts and liquid solutions. The experimental part of the dissertation, contains the results of physical-mechanical, microscopic and durability properties of geopolymer mortars and concrete based on fly ash. For the purpose of determining the effect of different byproducts on characteristics of geopolymer mixtures, 24 batches of mortar and 8 batches of concrete were made and tested. (converter slag, wood biomass ash, red mud, and waste glass) in the amount of 5% - 100% with different steps of replacement in relation to the binder mass. The samples of geopolymer mortar and concrete were cured at an ambient temperature

According to the test results some recommendations for the possible application of fly ash and other industrial byproducts for making geopolymer mortars and concretes are made. Tested materials might be used as construction building materials and according to their physical-mechanical characteristics and durability properties, they can be alternative solution for the traditional mortar and concrete mixtures.

**Key words:** geopolymers, industrial by-products, fly ash, mortar, concrete

## 1. UVOD

U današnje vreme timovi naučnika širom sveta ulažu značajne napore kako bi tržištu dali nove građevinske materijale koji ispunjavaju sve zahtevane ekološke norme [1]. Takvi građevinski materijali privlače pažnju naučnika koji nisu samo iz oblasti građevinarstva već i iz oblasti ekologije, tehnologije, proizvodnog mašinstva, hemije i dr. Svi oni ispitivanja sprovode sa istim ciljem - a to je stvaranje finalnog proizvoda koji povoljno utiče na smanjenje zagađenja životne sredine i za čije spravljanje je potreban isključivo otpad. Kako je u današnje vreme društvo u kojem živimo potrošački orijentisano [2], beleži se značajan rast količine čvrstog otpada [3]. U tome prednjače nusproizvodi čiji nastanak je neizbežan prilikom prerade polaznih industrijskih sirovina. Tako generisani otpad ne

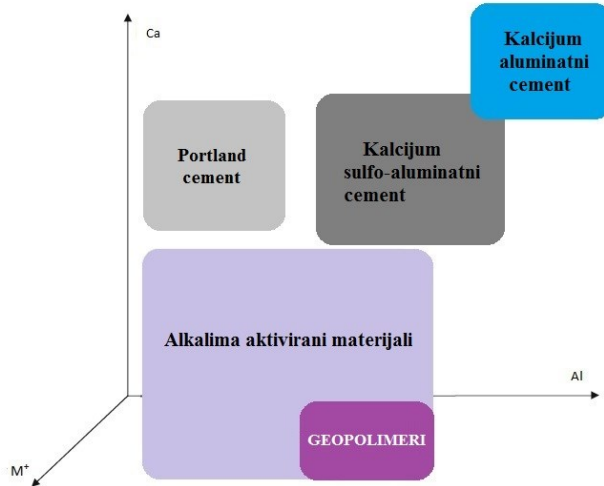
samo da ugrožava životnu sredinu, već i trajno zauzima prostor usled deponovanja. Tako deponovani materijal biva izložen štetnim atmosferskim uticajima i nepovratno gubi svoja početna povoljna svojstva [4].

Poznato je da je cement osnovna komponenta za spravljanje tradicionalnih cementnih kompozita. Ono što je široj masi manje poznato je da je za spravljanje takvih kompozita potrebna velika količina prirodnih resursa poput krečnjaka, peska i kamena kao i da se prilikom proizvodnje cementa emituje velika količina CO<sub>2</sub> [5]. S tim u vezi, od izuzetnog značaja bi bilo iznalaženje novog – alternativnog materijala za čije spravljanje bi se upotrebljavali industrijski nusproizvodi sa podneblja Republike Srbije.

Brojnim naučnim istraživanjima utvrđeno je da se industrijski nusproizvodi poput elektrofilterskog pepela, mlevenih opekarskih proizvoda, silikatne prašine, jalovine [6], konvertorske zgure [7], mlevene granulirane zgure [8], stakla katodnih cevi [9], crvenog mulja [10][11], pepela drvene biomase, otpadnih keramičkih pločica [12][4] i dr. mogu koristiti za spravljanje građevinskih kompozita. Neka od prvih naučnih istraživanja na Balkanu, koja obuhvataju eksperimentalna ispitivanja na bescementnim malterima i betonima rađena su na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala [4]. Tako dobijene mešavine nazvane su geopolimerne, a izvanredne karakteristike finalnih proizvoda pokazale su da se geopolimeri imaju svojstva konstruktivnih materijala.

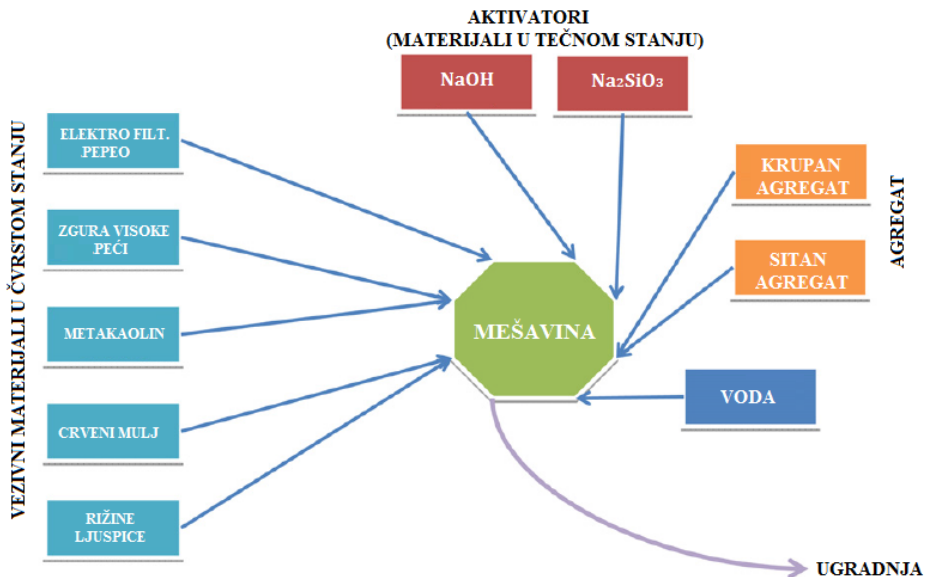
## 2. GEOPOLIMERI

Termin „geopolimeri“ datira još iz 1978. godine, a u naučnu literaturu uveo ih je Francuz J. Davidovits [13]. Geopolimeri su sačinjeni od dugačkih lanaca molekula nastalih geopolimerizacijom geopolimernih veziva i alkalnih rastvora. Termin „geopolimeri“ se koristi za opisivanje amorfnih do kristalnih reakcija nastalih kao posledica sjedinjavanja alkala iz aluminosilikatnih materijala i alkala iz rastvora hidroksidnih i silikatnih jedinjenja. Sjedinjavanjem polaznih materijala dolazi do očvršćavanja i formiranja čvrstog materijala kompaktne strukture [14]. U literaturi se geopolimeri definišu i kao podgrupa alkalima aktiviranih veziva nastalih alkalno silikatnom, karbonatnom ili sulfatnom aktivacijom otpadnih materijala. Geopolimeri predstavljaju ekološke kompozite i u današnje vreme smatraju se vezivnim materijalima treće generacije [15]. Za lakše razumevanje korišćenih termina na slici 1 dato je poređenje aluminosilikatnih i cementnih materijala.



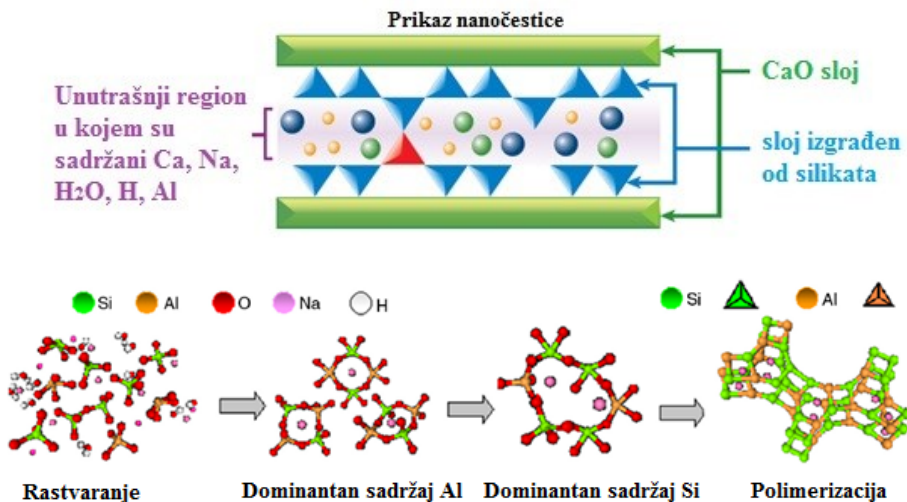
*Slika 1. Poređenje sadržaja pojedinih hemijskih elemenata aluminosilikatnih materijala sa Portland cementom i kalcijum sulfoaluminatnim cementom [16]*

Geopolimeri se definišu i kao čvrsti i stabilni aluminosilikatni materijali, a kao polazne sirovine za njihovu pripremu mogu se koristiti prirodni materijali (zeolit, glina iz zemljine kore ili sl.) ili industrijski nusproizvodi (troska, zgura, elektrofilterski pepeo, metakaolin, crveni mulj) i rastvori u tečnom stanju poput NaOH ili KOH i  $\text{Na}_2\text{SiO}_2$  ili  $\text{K}_2\text{SiO}_2$  i voda [15]. Na slici 2 dat je šematski dijagram spravljanja geopolimernih kompozita. Sjedinjavanjem polaznih sirovina i aktivatora formira se gel koji usled povećanja starosti i procesa očvršćavanja formira kompaktnu i jaku trodimenzionalnu mrežu. Očvršćavanje geopolimernih kompozita može se odvijati u ambijentalnim uslovima ili pri uslovima povišene temperature [8]. Struktura finalnog geopolimera opisuje se kao gelska i u direktnoj je vezi za karakteristikama polaznih sirovina. Tako, u koliko se u hemijskom sastavu polaznih sirovina nađu jedinjenja oblika  $(\text{Na},\text{K})_2\text{O} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  formirani gel se prema skraćenoj nomenklaturi može zapisati u obliku C-A-S-H (kalcijum alumino silikat hidrat) [18]. Finalni gel može biti i nešto drugačijeg oblika kada se u hemijskom sastavu nađu sirovine sa dominantnim sadržajem  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . Tako formirani gel se prema skraćenoj nomenklaturi zapisuje u obliku N-A-S-H gel (N -  $\text{Na}_2\text{O}$ ; A -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; S -  $\text{SiO}_2$ ; H -  $\text{H}_2\text{O}$ ) [19]. Takav se drugačije naziva geopolimer [15]. Na slici 3 dati su strukturalni modeli C-A-S-H i N-A-S-H gelova.

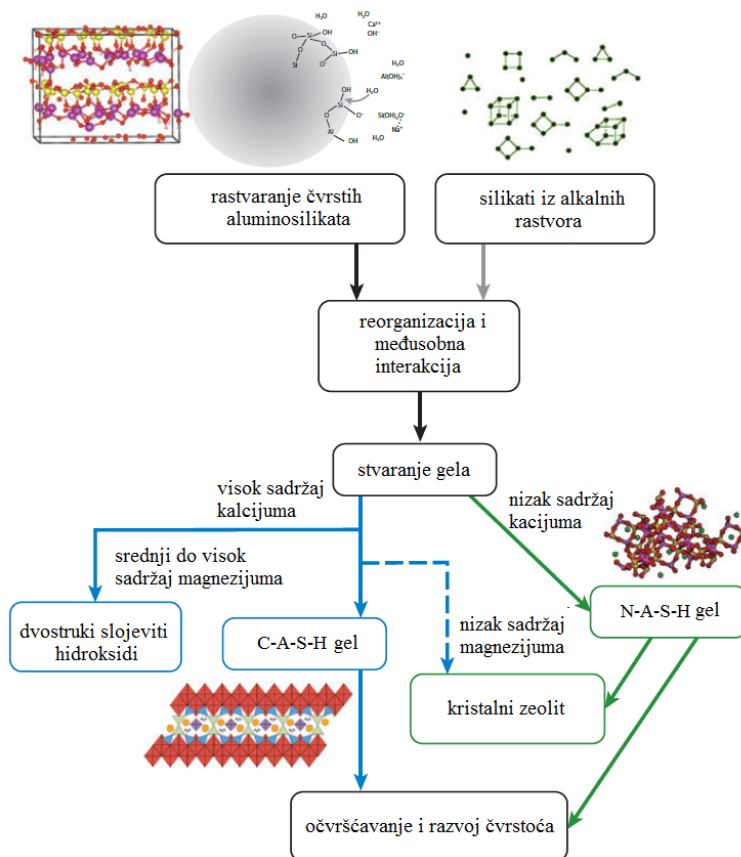


*Slika 2. Šematski dijagram spravljanja geopolimernih kompozita [17]*

Iz svega prethodno navedenog zaključuje se da su formirane gelske faze posledica prisustva oksidnih jedinjenja kalcijuma, silicijuma i aluminijuma u polaznim sirovinama, a hemijska reakcija koja nastaje kao posledica je međusobno dejstvo oksidnih jedinjenja i alkalnih rastvora. Za lakše razumevanje nastalih gelskih faza može koristiti slika 4.



*Slika 3. Strukturalni modeli C-A-S-H i N-A-S-H gela [20][19]*



*Slika 4. Produkti reakcije aktiviranja čvrstih aluminosilikatnih i alkalnih rastvora [20]*

### 3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

#### 3.1 Korišćeni materijali

Nusproizvodi koji se mogu koristiti kao vezivni materijali za spravljanje geopolimernih mešavina su mnogobrojni i nastaju u granama teške i lake industrije. Jedan od najčešće korišćenih industrijskih nusproizvoda je elektrofilterski pepeo. On se definiše kao fini prah dobijen elektrostatičkim ili mehaničkim taloženjem praškastih čestica iz dimnih gasova peći loženih ugljem. Razlozi za čestu upotrebu elektrofilterskog pepela su mnogobrojni ali prednjače njegova dostupnost i to što se može lako aktivirati alkalnim jedinjenjima [21]. Elektrofilterski pepeo koji je korišćen u eksperimentu je poreklom iz termoelektrane „Kostolac B“ u Kostolcu. U eksperimentu je

korišćena i granulirana zgura visoke peći koja je nusproizvod koji nastaje prilikom proizvodnje gvožđa. Nakon procesa hlađenja gvožđa zgura isplivava i granulira se u granulacijskoj komori [22]. Korišćena konvertorska zgura nastaje pri proizvodnji čelika prilikom kojeg dolazi do izdvajanja nečistoće iz rastaljenog čelika [23]. Granuliranu zguru visoke peći i konvertorsku zguru je za potrebe ispitivanja ustupila kompanija HBIS GROUP Serbia Iron & Steel d.o.o. Beograd – pogon u Smederevu. Korišćeni pepeo drvene biomase poreklom je iz termoelektrane „Bioenergy point“ iz Boljevca. Pepeo je dobijen sagorevanjem drvnog energenta nakon čega je u ložištu kotlova nastao nusproizvod nazvan pepeo drvene biomase [24]. Tako nastali industrijski otpad je uzorkovan i korišćen je u daljem eksperimentalnom istraživanju. Korišćeni crveni mulj dobijen je kao nusproizvod prilikom proizvodnje aluminijuma. Postupak proizvodnje podrazumevao je preradu rude boksita primenom Bajerovog postupka [25][26]. Otpadno staklo je za potrebe eksperimentalnog ispitivanja uzorkovano na lokalnom gradilištu gde je vršena energetska sanacija objekta.

Postupak pripreme korišćenih veziva podrazumevao je usitnjavanje i prosejavanje materijala kroz sito otvora 0,09 mm. Izgled materijala pripremljenih za korišćenje dat je na slici 5. Nakon pripreme materijala izvršeno je ispitivanje hemijskih, fizičkih i mikrostrukturnih karakteristika korišćenih nusproizvoda.



*Slika 5. Materijali korišćeni u ispitivanju s leva: elektrofilterski pepeo, granulirana zgura, konvertorska zgura, pepeo drvene biomase, crveni mulj i otpadno staklo*

Na fino samlevenim uzorcima industrijskih nusproizvoda izvršeno je ispitivanje hemijskog sastava, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 1. Prema hemijskom sastavu elektrofilterskog pepela može se zaključiti da on spada u grupu silikatnih pepela tj. prema standardu ASTM C618 zadovoljava uslove kvaliteta za klasu „F“ (grupa kiselih pepela). Na uzorku granulirane zgure visoke peći uočava se visok sadržaj  $\text{SiO}_2$  i  $\text{CaO}$ , a gledano u procentno-masenom udelu u materijalu, sadržaj  $\text{CaO}+\text{MgO}+\text{SiO}_2$  čini 90,69 % mase materijala. Takav hemijski sastav potvrđuje da se prema

standardu SRPS EN 15167-1:2010 granulirana zgura visoke peći može koristiti kao dodatak tipa II pri spravljanju cementa. Visok sadržaj SiO<sub>2</sub> i CaO prisutan je i u hemijskom sastavu konvertorske zgre i otpadnog stakla, dok je kod pepela drvene biomase jedino dominantan sadržaj CaO. Hemijski sastav crvenog mulja je nešto drugačiji pa su u hemijskom sastavu najdominantniji SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Fizičke osobine vezivnih materijala određene su ispitivanjem zapreminske i specifične mase primenom standarda SRPS B.C8.023:1997, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 2. Može se zaključiti da se specifične mase ispitivanih materijala razlikuju. Najmanja specifična masa izmerena je na uzorku elektrofilterskog pepela i iznosi 2,24 g/cm<sup>3</sup>, dok je ona najveća na uzorku konvertorske zgre i iznosi 3,45 g/cm<sup>3</sup>.

*Tabela 1. Hemijski sastav korišćenih vezivnih materijala*

Parametar	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
	%									
Elektrof. pepeo	51,68	11,58	20,16	7,43	2,41	1,02	0,12	1,04	0,88	1,04
Gran. zgura iz visoke peći	38,1	0,70	7,17	39,48	9,86	0,36	-	-	0,51	0,23
Konvert. zgura	22,20	6,82	15,60	44,21	8,44	-	0,1	0,04	0,01	0,01
Pepeo drvene biomase	4,45	5,32	1,85	48,83	6,62	2,11	2,45	0,11	0,46	10,42
Crveni mulj	32,8	4,63	9,92	2,37	0,22	-	-	-	0,12	0,12
Otpadno staklo	68,30	0,65	1,40	8,6	4,1	0,05	-	-	15,6	-

*Tabela 2. Fizičke osobine korišćenih vezivnih materijala*

Vrsta ispitivanja	Elektrof. pepeo	Gran. zgura iz visoke peći	Konvert. zgura	Pepeo drvene biomase	Crveni mulj	Otpadno staklo
Specifična masa (g/cm <sup>3</sup> )	2,24	2,85	3,45	2,32	2,77	2,45
Zapreminska masa u rastresitom stanju (g/cm <sup>3</sup> )	0,81	1,24	1,55	0,45	0,99	0,87
Standardna konzistencija (%) SRPS EN 196-3:2017	32	29,5	29	41	31,5	29,5
Boja	siva	braon	siva	siva	crvena	bela



Pucolanska aktivnost ispitana je prema standardu SRPS B.C1.018:2015 na uzorcima malterskih prizmi dimenzija  $40 \times 40 \times 160$  mm. Rezultati ispitivanja pucolanske aktivnosti dati su u tabeli 3. Prilikom ispitivanja materijala, najveća klasa pucolana dobijena je na uzorcima elektrofilterskog pepela – „klasa 10“. Granulisana zgura visoke peći, pepeo drvene biomase i otpadno staklo zadovoljavaju uslove kvaliteta za „klasu 5“, dok konvertorska zgura i crveni mulj ne ispunjavaju uslove kvaliteta za najnižu klasu pucolana.

Određivanje indeksa aktivnosti sprovedeno je prema standardu SRPS EN 450-1:2014. Ispitivanje je izvršeno na uzorcima malterskih prizma dimenzija  $40 \times 40 \times 160$  mm, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 4. Veoma visok indeks aktivnosti izmeren je na uzorcima maltera spravljenim sa elektrofilterskim pepelom i pri starosti od 28 i 90 dana iznosi 96 % i 105 %, respektivno.

*Tabela 3. Čvrstoće prilikom provere pucolanske aktivnosti vezivnih materijala*

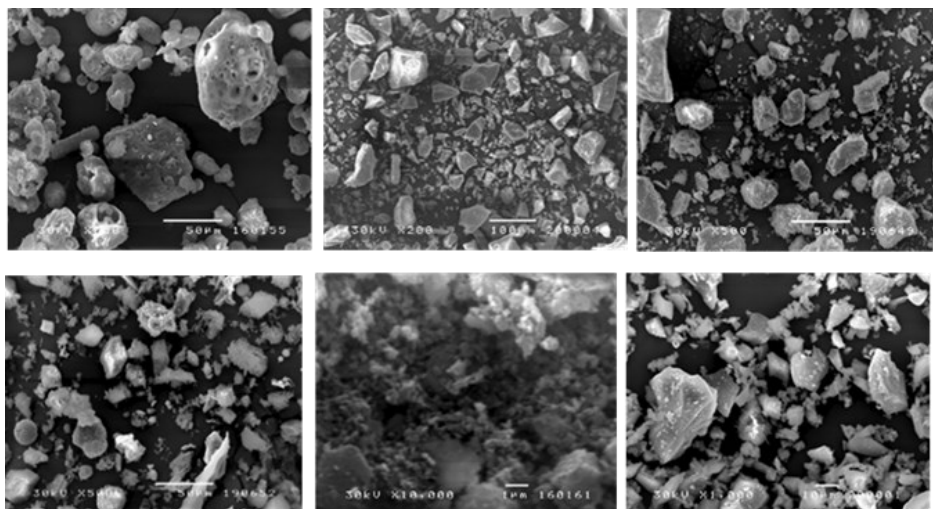
Uzorak	Čvrstoća pri savijanju [N/mm <sup>2</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku [N/mm <sup>2</sup> ]	Klasa pucolana
Elektrof. pepeo	3,04	10,38	10
Gran. zgura iz visoke peći	2.60	5.24	5
Konvert. zgura	0.88	2.65	-
Pepeo drvene biomase	2,10	5,39	5
Crveni mulj	0,48	1,23	-
Otpadno staklo	2,32	5,05	5

Indeks aktivnosti maltera spravljenog sa granulisanom zgurom pri starosti maltera od 28 i 90 dana iznosi 86,59 % i 95,22 %. Koeficijenti indeksa aktivnosti maltera spravljenog sa pepelom drvene biomase pri starosti od 28 i 90 dana iznose 85,18 % i 85,11 %, dok mešavine spravljene sa dodacima konvertorske zgure, crvenog mulja i otpadnog stakla ne zadovoljavaju kriterijume propisane standardom.

**Tabela 4.** Čvrstoće prilikom provere indeksa aktivnosti vezivnih materijala

Uzorak	Elektrof. pepeo	Gran. zgura iz visoke peći	Konvert. zgura	Pepeo drvne biomase	Crveni mulj	Otpadno staklo	Portland cement
Rasprostiranje [mm]	130	130	126	112	107	137	135
Čvrstoća pri savijanju pri starosti od 28 dana [N/mm <sup>2</sup> ]	7,97	7,76	6,75	7,29	7,15	7,26	8,27
Čvrstoća pri savijanju pri starosti od 90 dana [N/mm <sup>2</sup> ]	8,88	8,68	7,75	6,78	7,20	8,14	8,34
Čvrstoća pri savijanju pri starosti od 28 dana [N/mm <sup>2</sup> ]	51,58	46,15	40,56	45,40	42,97	38,40	53,30
Čvrstoća pri pritisku pri starosti od 90 dana [N/mm <sup>2</sup> ]	60,23	54,85	44,09	49,60	46,01	48,73	57,60
Indeks aktivnosti 28 dana (%)	96,77	86,59	76,01	85,18	80,62	72,05	-
Indeks aktivnosti 90dana (%)	104,57	95,22	76,54	86,11	79,88	84,60	-

Ispitivanje mikrostrukturnih karakteristika industrijskih nusproizvoda vršeno je na uzorcima materijala u rastresitom stanju. Na slici 6 dat je fotoprikaz mikrostrukture uzoraka korišćenih nusproizvoda u rastresitom stanju. Posmatranjem fotografija može se zaključiti da svi ispitivani uzorci sadrže čestica različite veličine. Takođe, može se primetiti da se elektrofilterski pepeo, pepeo drvne biomase i crveni mulj pretežno sastoje od oblikih čestica, dok se mlevena granulisana zgura, konvertorska zgura i otpadno staklo pretežno sastoje od čestica nepravilnog oblika i oštih i rogljastih ivica. Takav oblik zrna posledica je mehaničkog usitnjavanja tj. trenja između čeličnih kugli, bubnja mlina i uzoraka.



*Slika 6. SEM fotoprikaz uzoraka u rastrestom stanju: gore s leva: elektrofilterski pepeo, granulisana zgura, konvertorska zgura, dole s leva: pepeo drvne biomase, crveni mulj i otpadno staklo*

Kao alkalni aktivatori za spravljanje geopolimernih maltera i betona korišćeni su natrijum silikat i natrijum hidroksid. Natrijum silikat proizvod je „Galenike-Magmasil“ d.o.o. iz Srbije. Aktivator je bio u tečnom agregatnom stanju a njegov sastav čine:  $\text{SiO}_2$  – 26.70%,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 13.30% i  $\text{H}_2\text{O}$  – 60% (modul Ms  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=2,2$ ). Natrijum hidroksid je proizvod „Oltchim S.A.“ iz Rumunije. Rastvaranje natrijum hidroksida izvršeno je 24 časa pre korišćenja. Rastvaranje je vršeno u vodi i tom prilikom stvoren je rastvor koncentracije 10 M. Tečni rastvori natrijum silikata i natrijum hidroksida pomešani su u masenoj razmeri tako da se stvori jedinstveni aktivator sa sadržajem 10%  $\text{Na}_2\text{O}$  u odnosu na masu veziva. Ovakav maseni sadržaj uticao je na sniženje modula Ms u natrijum silikatu do vrednosti 1,5.

U cilju poboljšanja konzistencije mešavina korišćen je aditiv superplastifikator komercijalnog naziva „Sika ViscoCrete 5380“.

### **3.2 Vrste malterskih i betonskih mešavina**

U eksperimentalnom istraživanju, za spravljanje maltera i betona, korišćeni su rečni i drobljeni agregat. Kao sitna frakcija (prva frakcija agregata – 0/4 mm) korišćen je agregat iz Južne Morave sa separacije „Braća Cvetković“ iz Toponice. Kao krupan agregat (druga i treća frakcija agregata 4/8 mm i 8/16 mm) korišćen je agregat dobijen drobljenjem magmatske stene gablo poreklom iz kamenoloma „Rakov dol“.

Eksperimentalno istraživanje obuhvatalo je spravljanje i ispitivanje više vrsti geopolimernog maltera i betona. Kao osnovno vezivo za spravljanje geopolimernih maltera korišćen je elektrofilterski pepeo, a njegova delimična ili potpuna zamena izvršena je pri procentno - masenom iznosu od 5 – 100 %. Zamena elektrofilterskog pepela u malterskim mešavinama spravljenim sa dodacima poput: konvertorske zgre, pepela iz drvene biomase, crvenim muljem i otpadnim staklom kretala se u procentno-masenom iznosu od 5 % do 20 %. Zamena elektrofilterskog pepela mlevenom granulisanom zgurom iz visoke peći kretala se u procentno-masenom iznosu od 20 % do 100 %. Jedna malterska mešavina napravljena je samo sa elektrofilterskim pepelom kao vezivom i ona je nazivana etalon geopolimernom malterskom mešavinom. Kod dvadeset dve malterske mešavine industrijski nusproizvodi su korišćeni kao vezivni materijali, dok je kod dve mešavine cement korišćen kao jedino vezivo. U skladu sa procentualnim učešćem dodatka i njegovim engleskim nazivom formirane su oznake malterskih serija. Svi geopolimerni malteri izrađeni su sa istom količinom veziva, rečnog agregata I frakcije (0/4 mm), alkalnih aktivatora (NaOH i Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) i vode. Kao oznaka elektrofilterskog pepela korišćena je oznaka „FA“ (fly ash), mešavine geopolimernog maltera spravljenog sa granulisanom zgurom iz visoke peći imaju oznaku - „GGBFS“ (eng. ground granulated blast furnace slag), konvertorska zgura - „SS“ (eng. steel slag), pepeo drvene biomase - „BIO A“ (eng. bio ash), crveni mulj – „RM“ (eng. red mud) i otpadno staklo – „G“ (eng. glass). Malter spravljen sa cementom CEM II A-L 42,5R nazvan „E II“, dok je malter spravljen sa cementom CEM III/B 32,5 N-LH/SR nazvan je „E III“. Vodovezivni faktor (w/b) je kod svih geopolimernih mešavina bio 0,42, a u cilju poboljšanja konzistencije maltera korišćen je superplastifikator. Ciljano je da rasprostiranje maltera bude 130 ± 10 mm. U tabeli 5 dat je sastav eksperimentalnih malterskih mešavina.

Jedan od ciljeva eksperimentalnog istraživanja bio je i ispitivanje uticaja različitih industrijskih proizvoda na karakteristike betona. U tu svrhu napravljeno je ukupno osam mešavina samougrađujućeg betona. Geopolimerne betonske mešavine spravljene su na bazi elektrofilterskog pepela, dok su kao delimična zamena osnovnog veziva korišćeni granulirana zgura iz visoke peći, konvertorska zgura, pepeo iz drvene biomase, crveni mulj i otpadno staklo. Zamena osnovnog veziva drugim industrijskim nusporizvodima bila je u procentno-masenom iznosu od 20 %. Kao i kod malterskih mešavina, u cilju upoređenja karakteristika geopolimernih i cementnih betona napravljene su još sve mešavine cement betona sa cementima CEM II A-L 42,5R i CEM III/B 32,5 N-LH/SR i

označene su kao „E II“ и „E III“. Kao mineralni dodatak za spravljanje cementnih betonskih mešavina korišćen je krečnjački filer. Za spravljanje betona korišćen je rečni i stenski agregat frakcionisan u tri osnovne frakcije, tako da je prvu frakciju činio rečni agregat 0/4 mm, a drugu i treću frakciju drobljeni stenski agregat frakcija 4/8 mm i 8/16 mm. Razmera mešanja agregata 0,4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm bila je 50 %, 15 % i 35 %, respektivno. Kod betonskih mešavina odnos vezivo/agregat i voda/vezivo bio je 0.259 i 0.37, respektivno.

*Tabela 5. Sastav eksperimentalnih malterskih mešavina*

Oznaka	Sastav [g]								SP [%]
	FA	Dodatak	CEM II 42,5 R	CEM III 32,5 N	Pesak	Voda	NaOH 10 M	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
FA	450	0	-	-	1350	20	56,16	303,23	2
20 GGBFS	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,5
40 GGBFS	270	180	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,4
60 GGBFS	180	270	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,2
80 GGBFS	90	360	-	-	1350	20	56,16	303,23	1
100 GGBFS	0	450	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,8
5 SS	427,5	22,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,5
10 SS	405	45	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,2
15 SS	382,5	67,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,0
20 SS	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,8
5 BIO A	427,5	22,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,8
10 BIO A	405	45	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,6
15 BIO A	382,5	67,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	-
20 BIO A	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	-
5 RM	427,5	22,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,3
10 RM	405	45	-	-	1350	20	56,16	303,23	-
15 RM	382,5	67,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	-
20 RM	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	-
5 G	427,5	22,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,5
10 G	405	45	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,3
15 G	382,5	67,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,2
20 G	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	1
E II	-	-	450	-	1350	225	-	-	0,2
E III	-	-	-	450	1350	225	-	-	0,5

**Tabela 6. Sastav eksperimentalnih betonskih mešavina**

Oznaka	Sastav [kg/m <sup>3</sup> ]										
	FA	Dodatak	CEM II 42,5 R	CEM III 32,5 N	Agregat			Voda	NaOH 10 M	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	SP [%]
					0/4	4/8	8/16				
FA	400	-	-	-	618	356	572	-	50	270	-
20 GGBFS	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-
20 SS	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-
20 BIO A	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-
20 RM	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-
20 G	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-
E II	-	140	380	-	890	267	623	195	-	-	1,2
E III	-	120	-	400	890	267	623	195	-	-	1,1

Kriterijum pri projektovanju betonskih mešavina bio je one ispunjavaju uslov za klasu konzistencije „SF1“ (primenom slump-flow testa). U tabeli 6 dat je sastav eksperimentalnih betonskih mešavina.

Svi uzorci geopolimernog maltera i betona su od vremena vađenja iz kalupa pa sve do vremena ispitivanja negovani u ambijentalnim uslovima, umotani u plastičnu foliju. Svi uzorci cementnog maltera i betona su od vremena vađenja iz kalupa pa do vremena ispitivanja negovani u krečnjačkoj vodi.

### 3.3 Ispitivanje maltera u svežem stanju

#### 3.3.1 Ispitivanje konzistencije na potresnom stolu

Ispitivanje konzistencije maltera izvršeno je prema standardu SRPS EN 13395-1:2010. U tu svrhu korišćeni su metalni kalup konusnog oblika i potresni sto. Metalni kalup je napunjen malterom koji je zbijan u dva sloja. Merenje rasprostiranja izvršeno je nakon podizanja metalnog kalupa i potresnog stola. Merenje je vršeno pomičnim merilom u dva upravna pravca, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 7.

Sve ispitivane malterske mešavine imaju približno istu vrednost rasprostiranja. Ipak, može se zaključiti da se smanjenjem procentno-masenog udela elektrofilterskog pepela u malterskoj mešavini smanjivala i potreba za superplastifikatorom i vodom. Najmanja vrednost rasprostiranja izmerena je na mešavini etalona oznake „FA“ i iznosi 122 mm. Najveća vrednost rasprostiranja izmerena je kod uzoraka oznake „15 G“ i „20 G“ i iznosi 139 mm.

*Tabela 7. Rezultati ispitivanja konzistencije metodom potresnog stola*

Oznaka malterske mešavine	Rasprostiranje na potresnom stolu (mm)	Oznaka malterske mešavine	Rasprostiranje na potresnom stolu (mm)
FA	122	15 BIO A	133
20 GGBFS	130	20 BIO A	133
40 GGBFS	131	5 RM	125
60 GGBFS	131	10 RM	131
80 GGBFS	131	15 RM	131
100 GGBFS	131	20 RM	139
5 SS	132	5 G	132
10 SS	131	10 G	132
15 SS	128	15 G	139
20 SS	130	20 G	139
5 BIO A	125	E II	130
10 BIO A	130	E III	131

Uslov kvaliteta: Tečna konzistencija > 200 mm, Plastično-tečna konzistencija 140 mm – 200 mm, Plastična konzistencija < 140 mm

### 3.3.2 Ispitivanje zapreminske mase u svežem stanju

Određivanje zapreminske mase svežeg maltera izvršeno je korišćenjem standarda SRPS EN 1015-6:2008/A1:2008. Za ispitivanje je korišćen litar-ski sud u koji je uliven svež malter. Postupak ispitivanja nastavljen je vibriranjem suda na potresnom stolu, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 8.

*Tabela 8. Rezultati ispitivanja zapreminske mase svežeg maltera*

Oznaka malterske mešavine	Zapreminska masa svežeg maltera (kg/m <sup>3</sup> )	Oznaka malterske mešavine	Zapreminska masa svežeg maltera (kg/m <sup>3</sup> )
FA	2170	15 BIO A	2175
20 GGBFS	2210	20 BIO A	2175
40 GGBFS	2220	5 RM	2175
60 GGBFS	2235	10 RM	2185
80 GGBFS	2250	15 RM	2195
100 GGBFS	2280	20 RM	2200
5 SS	2180	5 G	2180
10 SS	2220	10 G	2190
15 SS	2250	15 G	2195
20 SS	2270	20 G	2220
5 BIO A	2170	E II	2290
10 BIO A	2175	E III	2275

Zapreminska masa geopolimernih maltera manja je od zapreminskih masa cementnih maltera. Razlog tome je veće specifična masa cementa u odnosu na specifičnu masu industrijskih nusproizvoda. Najveća zapreminska masa geopolimernog maltera izmerena je na uzorcima oznake „100 GGBFS“ i iznosi 2280 kg/m<sup>3</sup>. Najmanja zapreminska masa izmerena je na mešavini etalona „FA“ i malteru „5 BIO A“ i iznosi 2170 kg/m<sup>3</sup>.

### **3.4 Ispitivanje maltera u očvrsлом stanju**

#### **3.4.1 Ispitivanje čvrstoće pri pritisku**

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku izvršeno je prema standardu SRPS EN 196-1:2017. Ispitivanje je vršeno na uzorcima starosti 2, 7, 28, 56 i 90 dana. Čvrstoća pri pritisku je određena na šest uzoraka svake serije maltera koji su dobijeni polovljenjem malterskih prizmi nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju. Rezultati ispitivanja dati su u tabeli 9.

Na čvrstoću pri pritisku maltera tokom vremena uticala je vrsta korišćenog veziva. Pri starosti maltera od 2 i 7 dana vrednosti čvrstoće pri pritisku geopolimernog maltera su manje od čvrstoća cementnog maltera. Pri kasnijim starostima, čvrstoće pri pritisku geopolimernog maltera dostižu i prestižu čvrstoće cementnog maltera. Kod maltera spravljenih sa granulisanom zgurom pri starosti od 28 dana najveća vrednost čvrstoće pri pritisku izmerena je na uzorcima oznake „100 GGBFS“ i iznosi 43,36 MPa. Trend rasta čvrstoće na ovoj mešavini nastavljen je i pri kasnijim starostima maltera od 56 i 90 dana kada čvrstoće iznose 57,71 MPa i 60,34 MPa. Kod mešavina oznake „20 GGBFS“, „40 GGBFS“, „60 GGBFS“ и „80 GGBFS“ primećeno je da je povećanje čvrstoće pri pritisku srazmerno povećanju procentnog sadržaja zgure u mešavini. Pri starosti od 28 dana sve mešavine spravljene sa konvertorskom zgurom imaju približno istu vrednost čvrstoće pri pritisku. Ipak, nešto veća pritiska čvrstoća izmerena je na uzorcima mešavine oznake „20 SS“ i iznosi 44,30 MPa. U skladu sa povećanjem starosti maltera povećavala se i pritiska čvrstoća ove mešavine tako da pri starosti maltera od 56 i 90 dana vrednosti čvrstoće iznose 47,80 MPa i 48,01 MPa, respektivno. Pri ranim starostima malterskih mešavina spravljjenih sa pepelom drvne biomase izmerene su vrlo visoke početne pritiska čvrstoće. Pomenute čvrstoće kreću se u opsegu od 22,50 MPa do 24,91 MPa i veće su od etalona „FA“. Najveća čvrstoća pri pritisku izmerena je na uzorcima oznake „15 BIO A“. Pri starosti od 28 dana vrednost čvrstoće pri pritisku pomenute mešavine iznosi 50,38 MPa. Trend rasta je nastavljen tako da čvrstoće pri pritisku pomenute mešavine pri starostima od 56 i 90 dana



iznose 51,99 MPa i 52,03 MPa, respektivno. Pri starosti od 28 dana sve malterske mešavine spravljene sa crvenim muljem pokazale se približno iste vrednosti pritiskne čvrstoće. Ipak, nešto veća vrednost izmerena je na mešavini oznake „10 RM“ i iznosi 47,82 MPa. Pri starosti od 56 i 90 dana čvrstoća pri pritisku ove mešavine iznosila je 49,28 MPa i 49,58 MPa, respektivno. Prema rezultatima ispitivanja maltera spravljenog sa otpadnim staklom može se uočiti da sve mešavine pri starosti od 7 dana imaju čvrstoće veće od etalona „FA“. Posmatranjem rezultata ispitivanja primećeno je da postoji trend rasta čvrstoća koji je srazmeran procentu zamene elektrofilterskog pepela otpadnim staklom do najviše 15 %. Nakon toga primećuje se pad čvrstoća pri pritisku. Pri starosti od 28 do 90 dana svi uzorci mešavina spravljenih sa otpadnim staklom imali su manju vrednost čvrstoće od uzoraka etalona oznake „FA“.

*Tabela 9. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku*

Oznaka malterske mešavine	Čvrstoća pri pritisku (MPa)					Oznaka malterske mešavine	Čvrstoća pri pritisku (MPa)				
	Starost maltera (dani)						Starost maltera (dani)				
	2	7	28	56	90		2	7	28	56	90
<b>FA</b>	5,61	15,57	42,81	46,27	50,60	<b>15 BIO A</b>	6,09	23,53	50,38	51,99	52,03
<b>20 GGBFS</b>	6,73	17,20	41,10	47,46	51,04	<b>20 BIO A</b>	10,94	22,50	45,27	45,91	46,82
<b>40 GGBFS</b>	3,02	16,48	40,14	47,71	51,27	<b>5 RM</b>	4,09	23,76	44,82	45,24	45,81
<b>60 GGBFS</b>	2,74	14,73	41,45	47,17	53,38	<b>10 RM</b>	5,79	22,94	47,82	49,28	49,58
<b>80 GGBFS</b>	6,96	12,74	41,04	48,91	57,61	<b>15 RM</b>	2,35	11,91	41,20	43,22	44,37
<b>100 GGBFS</b>	7,11	13,91	43,63	51,71	60,34	<b>20 RM</b>	2,14	7,73	40,84	42,01	43,74
<b>5 SS</b>	5,37	21,64	43,63	43,19	44,24	<b>5 G</b>	6,61	22,95	41,97	43,52	44,84
<b>10 SS</b>	6,39	24,78	42,46	44,18	44,23	<b>10 G</b>	5,81	21,47	40,33	41,14	42,65
<b>15 SS</b>	5,86	22,99	42,84	45,14	47,15	<b>15 G</b>	3,91	24,07	40,21	41,87	42,25
<b>20 SS</b>	7,41	23,30	44,30	47,8	48,01	<b>20 G</b>	3,30	19,88	40,73	41,79	43,72
<b>5 BIO A</b>	13,23	23,86	41,88	46,98	47,82	<b>E II</b>	28,56	40,45	47,08	60,33	63,34
<b>10 BIO A</b>	10,17	24,91	47,36	47,93	48,54	<b>E III</b>	14,51	24,36	38,04	45,9	49,54

### 3.4.2 Ispitivanje čvrstoće pri savijanju

Ispitivanje čvrstoće pri savijanju izvršeno je na uzorcima malterskih prizmi dimenzija 40 × 40 × 160 mm. Po tri uzorka svake malterske serije ispitivano je kako bi se odredila vrednost savojne čvrstoće maltera pri starostima od 2, 7, 28, 56 i 90 dana. Čvrstoća pri savijanju određena je prema standardu SRPS EN 196-1:2017, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 10.

*Tabela 10. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju*

Oznaka malterske mešavine	Čvrstoća pri savijanju (MPa)					Oznaka malterske mešavine	Čvrstoća pri savijanju (MPa)				
	Starost maltera (dani)						Starost maltera (dani)				
	2	7	28	56	90		2	7	28	56	90
<b>FA</b>	1,30	2,45	6,13	8,16	8,67	<b>15 BIO A</b>	1,74	3,51	7,56	6,74	7,62
<b>20 GGBFS</b>	1,31	2,69	6,80	7,93	8,55	<b>20 BIO A</b>	1,96	4,39	7,08	7,90	7,86
<b>40 GGBFS</b>	1,20	2,59	6,13	7,16	7,51	<b>5 RM</b>	1,51	2,51	7,2	7,89	7,93
<b>60 GGBFS</b>	1,20	2,39	5,16	7,26	7,56	<b>10 RM</b>	1,64	3,73	7,46	7,57	7,88
<b>80 GGBFS</b>	1,46	2,01	4,37	6,78	7,59	<b>15 RM</b>	1,00	2,10	6,76	6,85	6,98
<b>100 GGBFS</b>	1,87	2,10	5,95	7,13	7,92	<b>20 RM</b>	0,96	2,17	6,60	7,03	7,25
<b>5 SS</b>	1,23	4,64	7,35	7,56	7,98	<b>5 G</b>	1,41	4,18	7,02	7,47	7,48
<b>10 SS</b>	1,37	4,43	7,17	7,86	7,97	<b>10 G</b>	1,41	4,02	6,89	7,02	7,86
<b>15 SS</b>	1,48	4,24	6,98	7,55	7,17	<b>15 G</b>	1,40	3,75	6,88	7,11	7,81
<b>20 SS</b>	1,06	4,56	6,25	7,10	7,30	<b>20 G</b>	1,41	3,78	6,23	6,39	6,63
<b>5 BIO A</b>	1,82	4,70	7,17	7,57	7,89	<b>E II</b>	6,41	7,34	7,59	9,47	10,01
<b>10 BIO A</b>	2,02	4,48	7,00	7,53	7,64	<b>E III</b>	3,11	5,11	5,57	5,96	6,08

Prema rezultatima ispitivanja čvrstoće pri savijanju može se zaključiti da su čvrstoće maltera pri ranim starostima male. Najveća promena čvrstoće pri savijanju izmerena je pri starosti maltera od 7 do 28 dana. Nakon toga porast čvrstoća i dalje postoji ali je on zanemarljivo mali u odnosu na prethodno merenje. Kod maltera spravljenih sa granulisanom zgurom, pri starosti od 28 dana, najveća vrednost čvrstoće na savijanje izmerena je na mešavini oznake „20 GGBFS“. Čvrstoća pri savijanju te mešavine iznosi 6,80 MPa. Čvrstoća pomenute mešavine je zadržala trend rasta i pri kasnijim starostima od 56 i 90 dana kada iznosi 7,93 MPa i 8,55 MPa. Kod mešavina spravljenih sa konvrtorskom zgurom najveću vrednost čvrstoće pri savijanju pri starosti od 28 dana ima mešavina oznake „5 SS“. Vrednost savojne čvrstoće te mešavine je 7,35 MPa. Vrednosti čvrstoće geopolimernog maltera pri starosti od 90 dana su do 6 % veće od vrednosti čvrstoća maltera istih serija starosti od 56 dana. Kod maltera spravljenog sa pepelom drvene biomase starosti 28 dana najveću vrednost čvrstoće pri savijanju ima mešavina „15 BIO A“ i iznosi 7,56 MPa što je za oko 23,5 % veće od etalona „FA“. Pri pomenutoj starosti maltera vrednosti čvrstoće pri savijanju mešavina oznake „10 BIO A“ i „20 BIO A“ iznose 7,00 MPa i 7,08 MPa, respektivno. Čvrstoća pri savijanju uzoraka maltera spravljenih sa crvenim muljem je pri starosti od 28 dana bila veća od čvrstoće etalona „FA“. Pri pomenutoj starosti najveća vrednost čvrstoće pri savijanju izmerena je na mešavini oznake „10 RM“ i iznosi 7,46 MPa. Trend rasta čvrstoće nastavljena je s povećanjem starosti uzoraka (56 i 90 dana). Ipak, to nije bilo

dovoljno da mešavine spravljene sa dodatkom crvenog mulja budu bolje rangirane od etalon mešavine. Kod mešavina spravljenih sa otpadnim staklom pri starosti od 28 dana najveća čvrstoća na savijanje izmerena je na uzorcima oznake „5 G“ i iznosi 7,02 MPa. Trend rasta čvrstoće pomenute mešavine nastavljen je i pri kasnijim starostima. Ipak, najveća čvrstoća pri savijanju pri starosti od 90 dana izmerena je na uzorcima oznake „10 G“ i iznosi 7,86 MPa.

### 3.4.3 Ispitivanje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa

Ispitivanje je brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke očvrslog maltera vršeno je neposredno pre ispitivanja čvrstoće pri savijanju. Ispitivanje je sprovedeno prema važećim standardima SRPS U.M1.042:1998 i SRPS EN 12504-4:2008. Pre početka ispitivanja na krajeve malterskih prizmi nanešena je tovatna mast, a nakon toga je izvršeno postavljanje (uranjanje) sonde po najdužoj strani prizme. Matematičke funkcije promene čvrstoće pri pritisku i brzine prolaska ultrazvučnog impulsa dati su u tabeli 11.

*Tabela 11. Matematičke funkcije promene čvrstoće pri pritisku i brzine prolaska ultrazvučnog impulsa i koeficijenti korelacije*

Oznaka malterske mešavine	Matematičke funkcije	Oznaka malterske mešavine	Matematičke funkcije
<b>FA</b>	$y = 516,94\ln(x) + 1167,3, R^2 = 0,9921$	<b>15 BIO A</b>	$y = 472,13\ln(x) + 1304,4, R^2 = 0,9648$
<b>20 GGBFS</b>	$y = 544,11\ln(x) + 1111,4, R^2 = 0,9967$	<b>20 BIO A</b>	$y = 428,95\ln(x) + 1519,9, R^2 = 0,9624$
<b>40 GGBFS</b>	$y = 410,51\ln(x) + 1650,9, R^2 = 0,9871$	<b>5 RM</b>	$y = 547,02\ln(x) + 980,83, R^2 = 0,9899$
<b>60 GGBFS</b>	$y = 398,81\ln(x) + 1675,9, R^2 = 0,9687$	<b>10 RM</b>	$y = 493,24\ln(x) + 1187,8, R^2 = 0,9792$
<b>80 GGBFS</b>	$y = 289,62\ln(x) + 2118,4, R^2 = 0,8026$	<b>15 RM</b>	$y = 529,85\ln(x) + 1068,7, R^2 = 0,9806$
<b>100 GGBFS</b>	$y = 576,7\ln(x) + 1143,2, R^2 = 0,9809$	<b>20 RM</b>	$y = 530,89\ln(x) + 1159,1, R^2 = 0,9478$
<b>5 SS</b>	$y = 459,24\ln(x) + 1473,1, R^2 = 0,9784$	<b>5 G</b>	$y = 520,28\ln(x) + 1163,4, R^2 = 0,8671$
<b>10 SS</b>	$y = 555,44\ln(x) + 1078,6, R^2 = 0,9294$	<b>10 G</b>	$y = 546,78\ln(x) + 1097,2, R^2 = 0,9266$
<b>15 SS</b>	$y = 454,56\ln(x) + 1433,2, R^2 = 0,8964$	<b>15 G</b>	$y = 646,31\ln(x) + 782,02, R^2 = 0,9767$
<b>20 SS</b>	$y = 468,53\ln(x) + 1391,7, R^2 = 0,9695$	<b>20 G</b>	$y = 668,77\ln(x) + 685,05, R^2 = 0,9545$
<b>5 BIO A</b>	$y = 802,71\ln(x) + 209,62, R^2 = 0,9566$	<b>E II</b>	$y = 292,52\ln(x) + 2739,5, R^2 = 0,5031$
<b>10 BIO A</b>	$y = 455,17\ln(x) + 1371,9, R^2 = 0,9826$	<b>E III</b>	$y = 572,76\ln(x) + 1686, R^2 = 0,991$

Matematičke funkcije date u tabeli dobijene su statističkom obradom srednje vrednosti čvrstoće pri pritisku i srednje vrednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz iste uzorke i pri istoj starosti maltera. Koeficijenti korelacije ( $R^2$ ) kreću se u opsegu od 0,8026 za mešavinu

oznake „80 GGBFS“ do 0,9967 za mešavinu oznake „20 GGBFS“. Ovako visoki koeficijenti korelacije potvrđuju da porast brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke malterskih prizmi prati porast čvrstoće pri pritisku maltera istog sastava i ekvivalentne starosti. S toga, može se zaključiti da brzina prolaska ultrazvučnog impulsa može biti parametar pomoću kojeg se sa velikom tačnošću može predvideti čvrstoća pri pritisku geopolimernog maltera.

#### **3.4.4 Ispitivanje otpornosti na dejstvo mraza**

Otpornost maltera na dejstvo mraza određena je prema standardu SRPS EN 14617-5:2014. Ispitivanje je izvršeno na šest uzoraka svake malterske serije. Ispitivanje je vršeno na uzorcima oblika prizmi dimenzija  $40 \times 40 \times 160$  mm. Uzorci maltera su nakon dostizanja starosti od 28 dana izvučeni iz plastične folije. Tri uzoraka svake serije izlagano je naizmeničnom dejstvu ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja. Jedan ciklus zamrzavanja i odmrzavanja sastojao se iz četvoročasovnog potapanja uzoraka u vodu temperature  $20 \pm 5$  °C i četvoročasovnog smrzavanja na temperaturi od  $-20 \pm 5$  °C. Ukupan broj ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja bio je 25. Druga tri uzorka svake malterske serije služili su kao referentni uzorci i oni su do vremena ispitivanja negovani u laboratorijskim uslovima. U cilju određivanja otpornosti maltera na dejstvo mraza sračunati su koeficijenti otpornosti  $KM_{f25}$  u  $KM_{c25}$ . Rezultati ispitivanja dati su u tabeli 12.

Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da svi ispitivani uzorci ispunjavaju uslove kvaliteta u pogledu otpornosti na dejstvo mraza, a koeficijenti otpornosti kreću se u opsegu od 0,75 do 1,26. Vizuelne promene na ispitivanim uzorcima nisu bile uočene. Kod uzoraka spravljenih sa granulisanom zgurom najveći koeficijent otpornosti  $KM_{c25}$  sračunat je na uzorcima oznake „20 GGBFS“ i iznosi 0,94. Može se zaključiti da je vrednost koeficijenta  $KM_{c25}$  povezana sa procentnim sadržajem granulisanog zgurom u vezivu. Kod svih uzoraka spravljenih sa konvertorskom zgurom čvrstoća pri savijanju i čvrstoća pri pritisku ispitivanih uzoraka su veće od čvrstoća referentnih uzorka istog sastava i ekvivalentne starosti. Ipak, može se zaključiti da se sa povećanjem sadržaja konvertorske zgurom u vezivu koeficijenti otpornosti na dejstvo mraza smanjuju. Kod uzoraka spravljenih sa pepelom drvene biomase koeficijenti otpornosti bili su približno jednaki, ali i kao takvi bili su manji od koeficijenata sračunatih za etalon „FA“. Najveći koeficijent otpornosti na dejstvo mraza u pogledu čvrstoće pri pritisku sračunat je na uzorcima maltera oznake „5 BIO A“ i „20 BIO A“ i iznosi 1. Najmanji koeficijent otpornosti sračunat je na uzorcima oznake

„10 BIO A“ i iznosi 0,96. Vrednosti koeficijenata otpornosti  $KM_{c25}$  kod uzoraka spravljenih sa crvenim muljem kreću se u opsegu od 0,82 do 0,91. Ovako dobijene vrednosti manje su od koeficijenata otpornosti na dejstvo mraza dobijenih na etalonu „FA“. Ipak, može se zaključiti da su svi ispitivani uzorci maltera spravljeni sa crvenim muljem otporni na dejstvo mraza u pogledu čvrstoće pri pritisku u trajanju od 25 ciklusa. Kod uzoraka spravljenih sa otpadnim staklom vrednosti koeficijenata otpornosti na dejstvo mraza  $KM_{f25}$  i  $KM_{c25}$  kreću se u opsegu od 0,9 do 1,14. Najveći koeficijenti sračunati su za mešavinu oznake „5 G“. Ipak, može se zaključiti da se vrednosti koeficijenata mogu dovesti u vezu sa procentualnom zastupljenošću otpadnog stakla u vezivu, kao i da pomenuta vrednost koeficijenta otpornosti opada sa povećanjem procentualno-masenog sadržaja stakla u vezivu.

*Tabela 12. Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza*

Oznaka malterske mešavine	Referentni uzorci		Uzorci izloženi ciklusima smrzavanja i odmrzavanja		Koeficijenti otpornosti	
	Čvrstoća pri savijanju (MPa) – $R_f$	Čvrstoća pri pritisku (MPa) – $R_c$	Čvrstoća pri savijanju (MPa) – $RM_f$	Čvrstoća pri pritisku (MPa) – $RM_c$	$KM_{f25}$ ( $RM_f/R_f$ )	$KM_{c25}$ ( $RM_c/R_c$ )
FA	6,12	42,62	7,71	46,46	1,26	1,09
20 GGBFS	7,77	47,16	7,57	44,15	0,97	0,94
40 GGBFS	6,99	47,13	5,99	41,28	0,86	0,88
60 GGBFS	7,06	47,01	5,78	38,8	0,82	0,83
80 GGBFS	6,66	48,17	5,77	40,18	0,87	0,83
100GGBFS	7,01	51,13	5,9	41,62	0,84	0,81
5 SS	7,35	43,75	7,94	47,25	1,08	1,08
10 SS	6,57	45,1	7,03	46,45	1,07	1,03
15 SS	7,26	40,78	7,13	41,6	0,98	1,02
20 SS	7,36	41,72	7,21	42,55	0,98	1,02
5 BIO A	7,14	45,88	7,67	45,83	1,07	1,00
10 BIO A	7,31	47,13	7,39	44,98	1,01	0,95
15 BIO A	6,16	51,02	7,49	48,95	1,22	0,96
20 BIO A	7,06	45,12	7,1	45,28	1,01	1,00
5 RM	7,1	45,02	5,52	41,18	0,78	0,91
10 RM	6,92	49,02	5,61	42,61	0,81	0,87
15 RM	6,31	43,02	5,02	37,84	0,80	0,88
20 RM	6,87	40,3	5,01	33,07	0,73	0,82
5 G	7,11	43,2	8,1	46,86	1,14	1,08
10 G	7	49,02	7,06	45,89	1,01	0,94
15 G	7	43,00	6,29	42,82	0,90	1,00

20 G	6,1	41,88	6,22	41,88	1,02	1,00
E II	6,23	57,36	5,67	43,02	0,91	0,75
E III	6	34,76	5,52	35,11	0,92	1,01
Uslov otpornosti na dejstvo ciklusa smrzavanja i odmrzavanja prema standardu SRPS EN 14617-5:2014						0,75 ...(75 %)

### 3.4.5 Ispitivanje otpornosti na dejstvo sulfata

Otpornost maltera na dejstvo sulfata ispitana je prema preporukama iz Izveštaja CEN/TR 15697:2014. Nakon 28 dana od spravljanja uzoraka po tri uzorka svake serije maltera su potopljeni u 5 % rastvor Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u trajanju od 180 dana. Otpornost na dejstvo sulfata određena je koeficijentima otpornosti koji su sračunati kao odnos čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju ispitivanih uzoraka prema čvrstoćama referentnih uzoraka istog sastava i starosti koji nisu izlagani dejstvu sulfatnog rastvora. Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo sulfata dati su u tabeli 13.

*Tabela 13. Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo sulfata*

Oznaka malterske mešavine	Referentni uzorci		Uzorci izloženi sulfatnom 5 % Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> rastvoru pri starosti 28 + 180 (σ <sub>s</sub> )		Koeficijenti otpornosti	
	Čvrstoća pri savijanju (MPa) – σ <sub>sf</sub>	Čvrstoća pri pritisku (MPa) – σ <sub>rc</sub>	Čvrstoća pri savijanju (MPa) – σ <sub>sf</sub>	Čvrstoća pri pritisku (MPa) – σ <sub>sc</sub>	(σ <sub>sf</sub> )/(σ <sub>rf</sub> )	(σ <sub>sc</sub> )/(σ <sub>rc</sub> )
FA	8,68	51,81	9,15	53,21	1,05	1,03
20 GGBFS	8,95	51,92	7,88	48,81	0,88	0,94
40 GGBFS	7,99	52,13	7,53	46,66	0,94	0,90
60 GGBFS	7,66	53,98	6,75	44,20	0,88	0,82
80 GGBFS	7,90	58,40	7,21	55,44	0,91	0,95
100GGBFS	8,01	63,44	7,26	73,73	0,91	1,16
5 SS	8,04	45,98	9,10	57,02	1,13	1,24
10 SS	7,99	46,13	8,98	53,34	1,13	1,16
15 SS	7,47	47,98	9,09	54,24	1,22	1,13
20 SS	7,59	49,04	8,40	52,76	1,08	1,08
5 BIO A	7,89	48,14	7,58	51,84	0,96	1,08
10 BIO A	7,77	49,16	8,12	49,39	1,05	0,93
15 BIO A	7,70	53,11	7,02	49,54	0,91	0,93
20 BIO A	8,06	46,92	8,74	52,43	1,08	1,12
5 RM	8,05	46,87	8,88	50,29	1,10	1,07
10 RM	8,08	50,19	9,22	49,74	1,14	0,99
15 RM	7,16	44,02	8,54	51,66	1,19	1,17

<b>20 RM</b>	7,51	44,01	7,90	44,54	1,05	1,01
<b>5 G</b>	7,62	47,14	8,77	56,18	1,15	1,19
<b>10 G</b>	8,01	43,18	8,57	52,92	1,07	1,23
<b>15 G</b>	7,97	41,25	8,73	51,98	1,09	1,26
<b>20 G</b>	7,00	43,14	7,37	44,30	1,05	1,03
<b>E II</b>	10,44	65,19	9,35	56,04	0,89	0,86
<b>E III</b>	8,87	51,50	10,03	47,07	1,13	0,91
Uslov otpornosti na dejstvo sulfata prema Izveštaju za ispitivanje performansi otpornosti na sulfata CEN/TR 15697:2008						0,80 (80 %)

Na osnovu rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo sulfata može se zaključiti da je kod većine ispitivanih uzoraka došlo do povećanja čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentne uzorke maltera istog sastava i ekvivalentne starosti koji nisu izlagani dejstvu agresivnog sulfatnog rastvora. Koeficijenti otpornosti na dejstvo sulfata u pogledu čvrstoće pri pritisku kretali su se u opsegu od 0,82 do 1,26. Prema rezultatima ispitivanja uzoraka spravljenih sa granulisanom zgurom može se zaključiti da se koeficijenti otpornosti na dejstvo sulfata smanjuju usled povećanja procentno-masenog sadržaja zgure u mešavini. Ovakav trend uočljiv je do procentnog sadržaja zgure od 60 % do koje se vrednost koeficijenta otpornosti kretao u granicama od 0,82 do 0,94. Kod mešavina kod kojih procentno-maseni sadržaj zgure čini više 60 % veziva („80 GGBFS“ i „100 GGBFS“) koeficijenti sulfatne otpornosti rastu i iznosi 0,95 i 1,16, respektivno. Kod mešavina spravljenih sa konvertorskom zgurom izmeren je porast čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri savijanju uzoraka koji su bili izlagani dejstvu sulfatnog rastvora u odnosu na referentne uzorke istog sastava i ekvivalentne starosti. Može se zaključiti da sadržaj zgure utiče na promenu koeficijenta otpornosti na dejstvo sulfata. Povećanjem procentno-masenog sadržaja konvertorske zgure u mešavini koeficijenti otpornosti na dejstvo sulfata se smanjuju. U pogledu čvrstoće pri pritisku, koeficijenti otpornosti kreću se u opsegu od 1,08 do 1,24. Mešavine spravljene sa pepelom drvene biomase pokazale su dobru otpornost na dejstvo sulfata. U pogledu pritisne čvrstoće najmanja otpornost izmerena je na uzorcima oznake „10 BIO A“ i „15 BIO A“ i iznosi 0,93. Najveća otpornost na dejstvo sulfata izmerena je na uzorcima oznake „20 BIO A“ i iznosi 1,12. Mešavine spravljene sa crvenim muljem su se takođe pokazale otpornim na dejstvo sulfata. Najmanji koeficijent otpornosti u pogledu čvrstoće pri pritisku izmeren je na uzorcima oznake „10 RM“ i iznosi 0,99. Najveći koeficijent otpornosti izmeren je na mešavini oznake „15 RM“. Vrednost koeficijenta otpornosti pomenute mešavine je za oko 14 % veća od koeficijenta otpornosti etalona „FA“ i iznosi 1,17. Mešavine spravljene sa otpadnim

staklom su se pokazale sulfatno otpornim pri datim uslovima ispitivanja. Može se zaključiti da u pogledu pritisnih čvrstoća vrednost koeficijenta otpornosti raste do procentno-masenog sadržaja otpadnog stakla od 15 %, nakon čega je primećen blagi pad. Najveći koeficijent otpornosti sračunat je na mešavini oznake „15 G“ i iznosi 1,26. Najmanji koeficijent otpornosti sračunat je za mešavinu oznake „20 G“ i kao i etalon „FA“ iznosi 1,03.

### 3.4.6 Ispitivanje izluživanja teških metala

Ispitivanje izluživanja teških metala vršeno je na eluatu. Za ispitivanje izluživanja korišćen je standard DIN 38414-S4. Ispitivanje je izvršeno na uzorcima geopolimernog maltera spravljenog sa istim procentno-masenom sadržajem vezivnih dodataka. Uzorci suvih malterskih prizmi su najpre usitnjeni, a prilikom ispitivanje korišćene su samo čestice sitnije od 10 mm. 100 g uzoraka maltera svake serije je stavljeno na metalnu rešetku koja je postavljena unutar staklenog suda, a zatim je u sud ulivena demineralizovana voda i pokrenut je mikser sa vertikalnim propelerom. Brzina rotacije propelera miksera bila je 150 okretaja u minuti. Nakon 24 sata od početka ispitivanja ispitan je hemijski sastav tečnog dela uzoraka – eluat, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 14. Vrednosti dobijenih rezultata upoređene su sa maksimalnim dozvoljenim vrednostima (MDK) iz važećeg Pravilnika o dozvoljeni količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje.

*Tabela 14. Rezultati ispitivanja eluata dobijenog iz malterskih mešavina*

Oznake malterske mešavine		FA	20GGBFS	100GGBFS	20 SS	20 BIO A	20 RM	20 G	E II
pH		10	10,7	11,3	10,3	10,5	10,2	10,4	11,6
EC ( $\mu\text{S/m}$ ) *		1880	1740	> 2000	> 2000	> 2000	1725	> 2000	> 2000
Početna pH vrednost rastvora		7							
Metal	Dozvoljena vrednost	Izmerena vrednost mg/l							
Al	***	1,656	1.868	2.455	2,981	1.705	2.094	0.9691	8,082
B	1,00	0,881	0.9879	0.9468	1,56	1.285	1.272	0.9890	2,703
Cd	0,01	0,0003	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0,50	0,0162	0.0129	0.0066	0,0359	0.0267	0.0218	0.1026	0,28
Fe	***	0,6348	0.5452	0.1045	1,948	0.8079	1.092	0.8802	0,1902



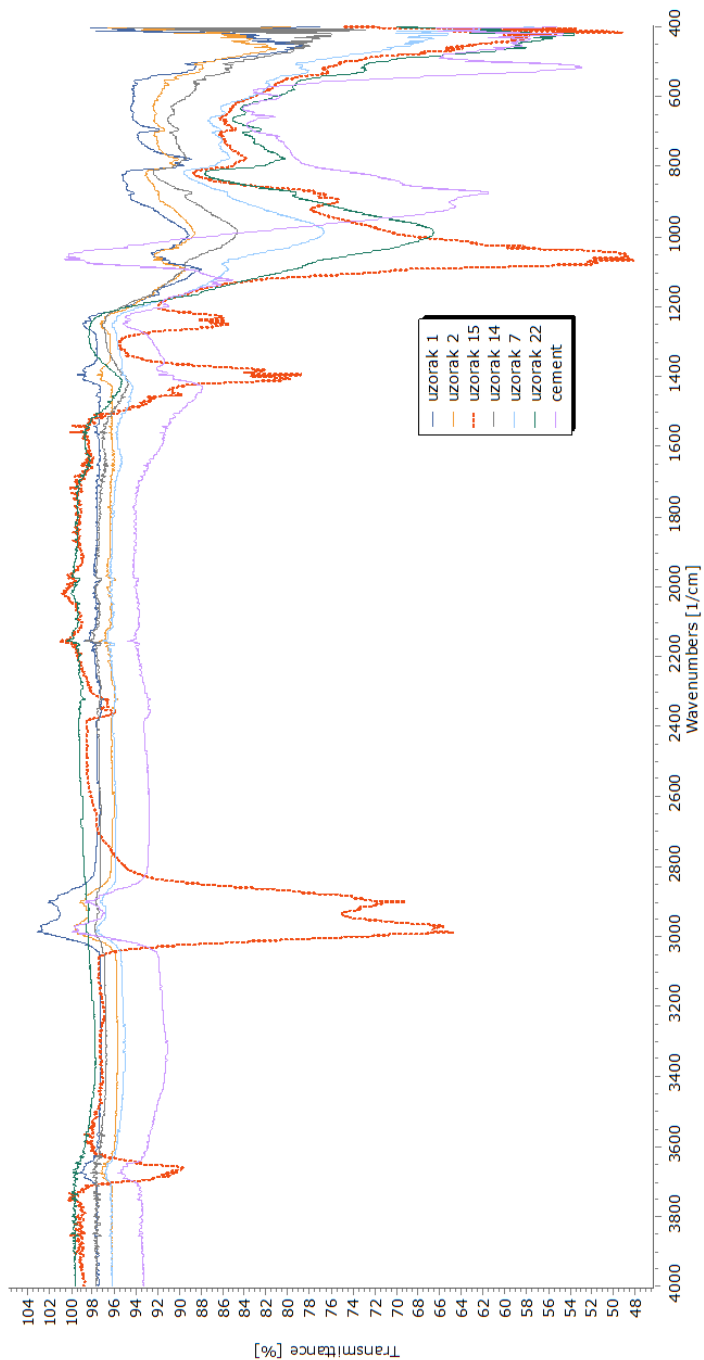
<b>Hg</b>	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Pb</b>	0,10	0,0326	0.0521	0.0342	0,0975	0.0412	0.0922	0.0419	0,011
<b>Zn</b>	1,00	0,1392	0.1273	0.0459	0,2852	0.2385	0.1262	0.1083	0,0465
<b>Ar</b>	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ni</b>	0,10	0,0607	0.1121	0.1030	0,112	0.1199	0.1244	0.1330	0,0348
<b>F</b>	1,50	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Cu</b>	0,10	-	0.0777	0.0568	0.0113	0.0455	0.0633	0.0533	0,0352

Ispitivanje izluživanja teških metala vršeno je sa ciljem da se opravda bezbedno korišćenje geopolimernih mešavina u praksi. Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da je kod pojedinih uzoraka došlo do prekoračenja sadržaja metala bora i nikla. Prilikom ispitivanja izluživanja vršeno je i praćenje pH vrednosti rastvora. Pomenuta vrednost se kod eluata geopolimernog maltera kretala u opsegu od 10 do 10,7, dok je kod eluata od cementnog maltera „E II“ iznosila 11,6.

### 3.4.7 FT-IR spektroskopija geopolimernog maltera

FT-IR spektralna analiza sprovedena je kako bi se pratile reaktivne zone Si-O i Al-O. FT-IR spektralna analiza rađena je u oblasti od 4000 do 400  $\text{cm}^{-1}$ , ali su prema Barbosa i drugi [27] razmatrane samo frekvencije niže 1200  $\text{cm}^{-1}$ .

FT-IR spektri geopolimernog maltera pokazuju nekoliko dominantnih signala koji se javljaju u vidu pikova. Najdominantniji su signali pri frekvencama: 420-430  $\text{cm}^{-1}$ , 850-900  $\text{cm}^{-1}$  i 1100  $\text{cm}^{-1}$ . Signal u opsegu 420-430  $\text{cm}^{-1}$  tumači se vibracijama izazvanim vezama Si-O/Al-O. U slučaju geopolimera to mogu biti veze Si-O-Al i Si-O-Mg. Signal 850-900  $\text{cm}^{-1}$  može se povezati sa vibracijama izazvanim vezama hidroksidnih jedinjenja Si-OH/Al-OH. Najjači signal vidljiv je pri frekvenciji od 1100  $\text{cm}^{-1}$  i on se može dovesti u vezu sa vibracionim vezama Si-O-Si koje su najčešće prisutne u kvarcu.



**Slika 7.** FT-IR spektar malterskih mešavina: Uzorak 1 – „FA“, Uzorak 2 – „20 GGBFS“, Uzorak 15 – „20 SS“, Uzorak 14 – „20 BIO A“, Uzorak 7- „20 RM“, Uzorak 22 – „20 G“, Uzorak cement – „E II“

### 3.5 Ispitivanje betona u svežem stanju

Na svežem samougrađujućem geopolimernom i cementnom betonu izvršeno je ispitivanje sledećih karakteristika: zapreminska masa u svežem stanju (SRPS EN 12350-6:2019), fluidnost i viskoznost SRPS EN 12350-8:2019, sposobnost prolaza između armature (SRPS EN 12350-10:2019), otpornost na segregaciju (SRPS EN 12350-11:2019) i sadržaj uvučenog vazduha (SRPS EN 12350-7:2019). Rezultati ispitivanja svežeg betona dati su u tabeli 15. Tabela daje srednje vrednosti dobijenih rezultata ispitivanja.

*Tabela 15. Karakteristike betona u svežem stanju*

Oznaka meš.	Zapr. masa	Rasprostiranje sleganje		Prolaz između armature (L box test 3 šipke)	Otp. na sagreg.	Sadržaj uvučenog vazduha	Temp. sveže bet. mase
		Fluidnost (slump flow test)	Viskoznost (T500 test)				
	kg/m <sup>3</sup>	mm	s	H1/H2	%	%	°C
FA	2335	570	9	0,82	5	3,9	30,5
20 GGBFS	2360	600	11	0,82	9	3,7	31,0
20 SS	2370	580	10	0,82	10	3,8	30,2
20 BIO A	2340	590	11	0,80	6	4,3	34,3
20 RM	2340	610	12	0,84	8	4,0	31,6
20 G	2345	600	13	0,81	9	3,7	30,2
E II	2460	640	6	0,90	12	3	27,7
E III	2495	650	6	0,94	13	3,5	26,8
<b>Vrednosti propisane standar.</b>	-	SF1 550-650 SF2 660-750	VS1 ≤ 2 VS2 > 2	PA 2 ≥ 0,8	SR1 ≤ 20 SR2 > 20	-	-

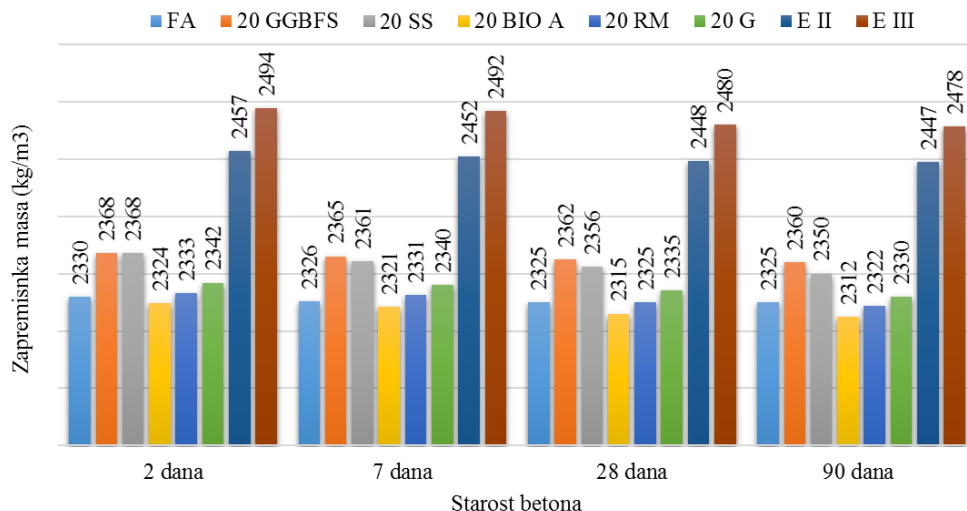
Zapreminska masa svežeg samougrađujućeg betona kreće se u opsegu od 2335 kg/m<sup>3</sup> do 2370 kg/m<sup>3</sup>. Ona se razlikuje u zavisnosti od industrijskog nusproizvoda korišćenog za spravljanje. Kao i u slučaju maltera, može se zaključiti da je zapreminska masa posledica specifičnih masa nusproizvoda. Prema rezultatima ispitivanja fluidnosti geopolimernog betona može se zaključiti da se rasprostiranje kreće u opsegu od 550 do 650 mm, što je dovoljno da ispitivani beton ispunjava uslove kvaliteta za klasu „SF1“. Ispitivanjem prolaza između armature, primenom L-box testa sa 3 šipke i otpornost na segregaciju zaključuje se da su izmerene vrednosti bile manje nego od vrednosti izmerenih na cementnom betonu. Ipak, dobijeni rezultati su bili dovoljni da beton ispunjava uslove kvaliteta za klase „PA2“ i „SR1“. Sadržaj uvučenog vazduha je bio veći kod samougrađujućeg geopolimernog betona u odnosu na cementni beton. Najmanji procenat uvučenog vazduha

izmeren je na geopolimernim betonskim mešavinama oznake „20 GGBFS“ i „20 G“ i iznosi 3,7 %. Najveći procenat uvučenog vazduha izmeren je na mešavini oznake „20 BIO A“ i iznosi 4,3 %.

### 3.6 Ispitivanje betona u očvrslom stanju

#### 3.6.1 Zapreminska masa očvrsllog betona

Ispitivanje zapreminske mase očvrsllog betona izvršeno je prema standardu SRPS EN 12390-7:2019. Ispitivanje je sprovedeno na uzorcima oblika kocke ivice 10 cm pri starostima od 2, 7, 28 i 90 dana. Ispitivani uzorci geopolimernog betona su do vremena ispitivanja negovani u ambijentalnim uslovima umotani u plastičnu foliju. Uzorci cementnog betona su do vremena ispitivanja negovani u krečnjačkoj vodi, a nakon toga je određena njihova zapreminska masa u vodozasićenom stanju. Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrsllog betona dati su na slici 8.

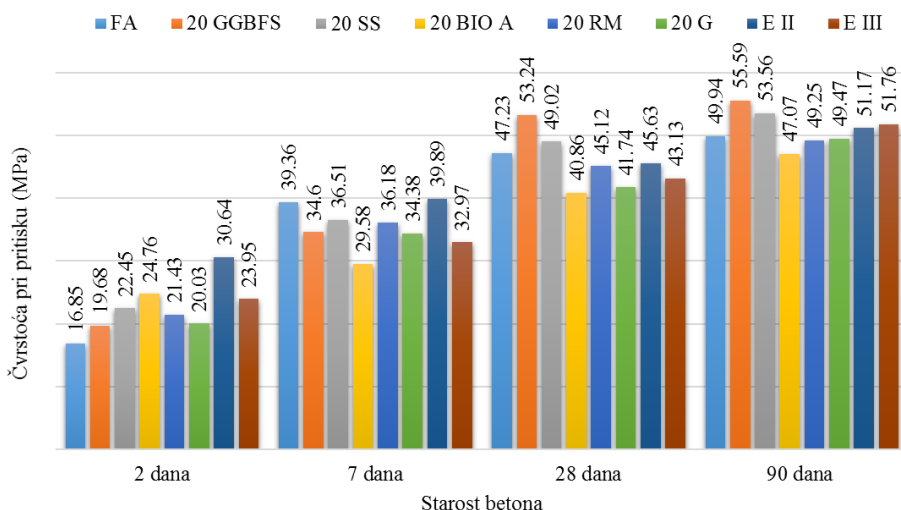


**Slika 8.** Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrsllog betona pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Prema rezultatima ispitivanja zapreminske mase betona u očvrslom stanju zaključuje se da sa povećanjem starosti uzoraka zapreminska masa betona smanjuje. Razlog toga je isparenje slobodne vode iz betonskih uzoraka. Rezultati dobijeni ovim ispitivanjem ekvivalentni su rezultatima ispitivanja zapreminske mase svežeg betona.

### 3.6.2 Ispitivanje čvrstoće pri pritisku

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku vršeno je izlaganjem uzorka očvrstlog betona dejstvu pritiskujuće sile. Uzorci oblika kocke ivice 10 cm ispitivani su pri starosti betona od 2, 7, 28 i 90 dana. Za ispitivanje je korišćena hidraulična presa marke „UTEST UTC – 5740“. Ispitivanje je izvršeno prema odredbama iz standarda SRPS EN 12390-3:2010, a rezultati ispitivanja dati su na slici 9.

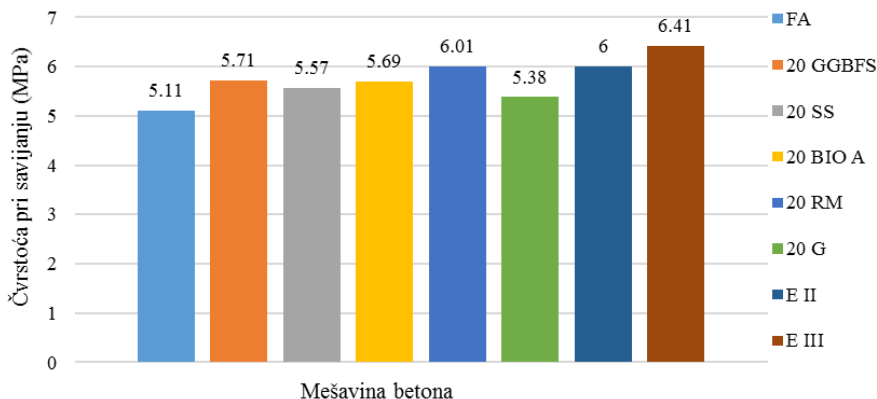


**Slika 9.** Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Prema izmerenim vrednostima može se zaključiti da čvrstoće pri pritisku geopolimernog betona rastu sa povećanjem starosti betona. Povećanje čvrstoće pri pritisku tokom vremena posledica je stepena ostvarene polimerizacije geopolimernog veziva. Rane pritisne čvrstoće geopolimernog betona (2 i 7 dana) su nešto manje od ranih čvrstoća cementnog betona. Ipak, pri kasnijim starostima od 28 i 90 dana, pritisne čvrstoće geopolimernih betona su veće ili su jednake čvrstoćama cementnog betona. Pri starosti betona od 28 i 90 dana najveća čvrstoća pri pritisku izmerena je na betonskim mešavinama oznake „20 GGBFS“ i „20 SS“. Čvrstoće pomenutih mešavina bile su i do 12,72 % veće od etalona „FA“. Čvrstoća pomenutih mešavina iznosila je 47,23 MPa i 49,94 MPa, respektivno. Čvrstoća pri pritisku koja je izmerena na uzorcima oznake „20 BIO A“, „20 RM“ i „20 G“ je pri merenjima na 28 dana i 90 dana bila i do 6,37 MPa manja od etalona „FA“.

### 3.6.3 Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem

Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem vršeno je nanošenjem sile na gornju površinu uzorka. Betonski uzorak oblika prizme, dimenzija  $100 \times 100 \times 400$  mm i starosti 90 dana oslonjen je na krajevima nakon čega je nanešeno opterećenje. Za ispitivanje je korišćena digitalna hidraulična presa marke „UTEST UTC – 5600“. Srednje vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem date su na slici 10.



**Slika 10.** Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona pri starosti betona od 90 dana

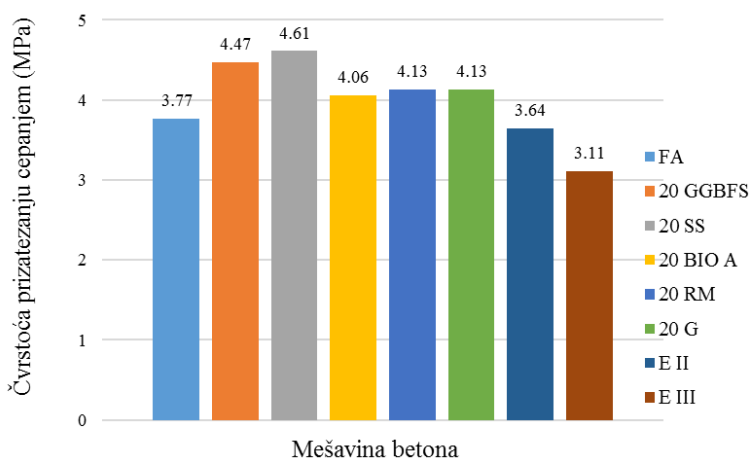
Prema rezultatima ispitivanja može se zaključiti da su industrijski nusproizvodi, koji su korišćeni kao delimična zamena elektrofilterkog pepela, imali uticaj na ostvarene čvrstoće. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem uzoraka spravljenih sa dodacima u vidu industrijskih nusproizvoda bila je veća od čvrstoće etalona „FA“. Najveća čvrstoća izmerena je na uzorcima oznake „20 RM“ i iznosila je 6,01 MPa. Vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem geopolimernih betona kod kojih je izvršena delimična zamena osnovnog veziva drugim industrijskim nusproizvodima bila je za 5,28 % do 17,61 % veća od etalona oznake „FA“.

### 3.6.4 Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem

Čvrstoća pri zatezanju cepanjem ispitana je na po tri uzoraka svake betonske serije. Ispitivanje je sprovedeno na uzorcima oblika cilindra dimenzija  $\varnothing 100 \times 100$  mm i starosti 90 dana. Za ispitivanje je korišćena hidraulična presa marke „UTEST UTC – 5740“, a postupak ispitivanja izveden je u skladu sa standardom SRPS EN 12390-6:2012. Srednje

vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem dati su na slici 11.

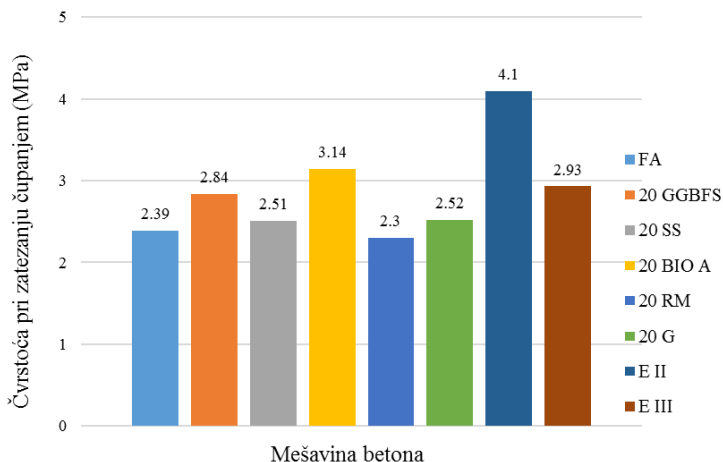
Prema vrednostima dobijenim ispitivanjem može se zaključiti da su industrijski nusproizvodi imali pozitivan uticaj na ostvarene čvrstoće. Ostvarene srednje vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona sa dodacima u vidu nusproizvoda bile su veće od geopolimernog etalona oznake „FA“. Najveća čvrstoća pri zatezanju cepanjem izmerena je uzorcima geopolimernog betona oznake „20 SS“ i iznosi 4,61 MPa. Tako izmerena vrednost bila je za 22,28 % veća od etalona „FA“. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem ostalih geopolimernih betonskih mešavina sa dodacima kretala se u opsegu od 4,06 MPa do 4,47 MPa.



*Slika 11. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem pri starosti betona od 90 dana*

### **3.6.5 Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju čupanjem metodom „Pull-off“**

Čvrstoća pri zatezanju čupanjem metodom „Pull-off“ ispitana je na po tri uzoraka svake betonske serije. Ispitivani uzorci bili su oblika ploče dimenzija  $150 \times 150 \times 50$  mm i starosti 90 dana. Prema preporukama iz standarda SRPS EN 1542:2010 najpre je izvršeno mašinsko zasecanje gornje površine betona dijamantskom burgijom prečnika  $\varnothing 50$  mm. Dubina zasečenog betona bila je  $15 \pm 5$  mm. Nakon zasecanja izvršeno je lepljenje čeličnih pečata prečnika 50 mm epoksidnim lepkom tipa „Sikadur-31 CF Normal“. Nakon 2 dana od lepljenja čeličnih pečata ispitana je čvrstoća pri zatezanju metodom „Pull-off“, a rezultati srednjih vrednosti ispitivanja dati su na slici 12.



**Slika 12.** Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“

Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da svi industrijski nusproizvodi, izuzev crvenog mulja, pozitivno utiču na povećanje vrednosti čvrstoće pri zatezanju čupanjem metodom „Pull-off“ u odnosu na etalon beton oznake „FA“. Najveća čvrstoća izmerena je na uzorcima oznake „20 BIO A“ i iznosi 3,14 MPa, što je za 31,38 % veće od čvrstoće etalona „FA“. Najmanja čvrstoća izmerena je na mešavini oznake „20 RM“ i iznosi 2,3 MPa. Vrednost pomenute čvrstoće je 3,77 % manja od čvrstoće etalona oznake „FA“. Prema izgledu geopolimernih uzoraka nakon ispitivanja, do loma je došlo isključivo po betonu, a najveća srednja dubina loma iznosila je 12,86 mm.

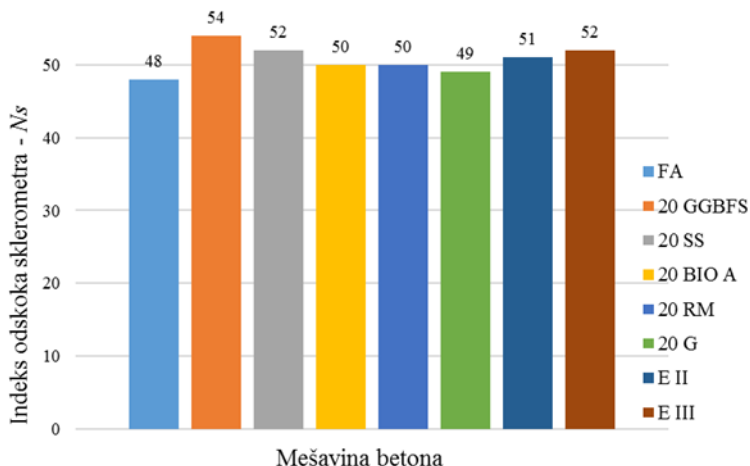
### 3.6.6 Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra

Površinska tvrdoća betona određena je sklerometrom. Metoda sklerometra spada u red nedestruktivnih metoda i može dati pouzdane orijentacione podatke o pritisnoj čvrstoći betona. Ispitivanje je izvršeno prinošenjem čekića sklerometra do površine uzoraka. Nakon ostvarivanja kontakta realizovan je udarac i očitana je odskočni broj na sklerometru. Za ispitivanje je korišćen sklerometar marke „N-34 Proceq SA Switzerland“. Za ispitivanje su korišćeni uzorci oblika kocke, ivice 10 cm i starosti 90 dana neposredno pre ispitivanja čvrstoće pri pritisku. Postupak ispitivanja sproveden je u skladu sa preporukama iz standarda SRPS EN 12504-2:2014, a rezultati ispitivanja dati su na slici 13.

Poređenjem rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona starosti 90 dana i indeksa odskoka sklerometra, merenog na istim uzorcima, može se



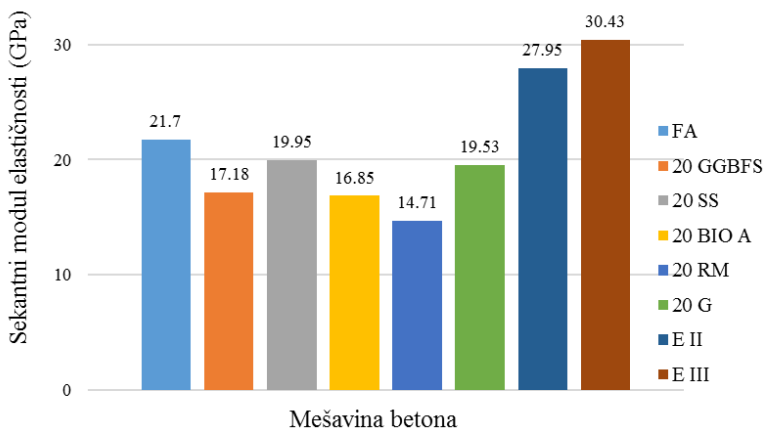
zaključiti da su vrednosti dobijenih rezultata delimično u saglasnosti. Naime, najveći odskok sklerometra izmeren je na betonskoj mešavini oznake „20 GGBFS“ i iznosi 54. Čvrstoća pri pritisku pomenute betonske mešavine iste starosti iznosi 55,59 MPa. Procentualna razlika navedenih vrednosti je 2,86 %. Ova procentualna razlika kod ostalih geopolimernih betona kreće se u opsegu od -0,95 % do 6,22 %. Prema pojedinim tumačenjima [28] ispitivani geopolimerni betoni spadaju u red veoma kvalitetnih betona koje karakteriše broj odskoka sklerometra veći od 40.



*Slika 13. Indeks odskoka sklerometra betona starosti 90 dana*

### **3.6.7 Određivanje statičkog modula elastičnosti**

Statički modul elastičnosti određen je pri dejstvu jednoosijalnog pritiska nakon određivanja čvrstoće pri pritisku. Uzorci betona oblika cilindra dimenzija  $\emptyset 150 \times 300$  mm i starosti 90 dana postavljeni su između potisnih ploča prese za ispitivanje betona nakon čega je izvršeno nanošenje opterećenja prema šemi iz standarda SRPS EN 12390-13:2015. Za ispitivanje su korišćena tri digitalna ekstenzometra marke „CONTROLS 55-C0222/F“. Srednje vrednosti modula elastičnosti svake betonske dati su na slici 14.



**Slika 14.** Sekantni modul elastičnosti betona starosti 90 dana

Najveća vrednost statičkog modula elastičnosti izmerena je na uzorcima betonske mešavine etalona oznake „FA“ i iznosi 21,7 MPa. Zamena dela elektrofilterskog pepela drugim industrijskim nusproizvodima uticala je na smanjenje vrednosti modula elastičnosti za 8,06 % do 32,21 %. Najmanja vrednost modula elastičnosti izmerena je na mešavini betona oznake „20 RM“ i iznosi 14,71 MPa. Može se zaključiti da su svi industrijski nusproizvodi koji su korišćeni kao delimična zamena elektrofilterskog pepela uticali na smanjenje vrednosti statičkog modula elastičnosti.

### 3.6.8 Otpornost prema dejstvu mraza

Ispitivanje otpornosti prema dejstvu mraza na betonu izvršeno je prema standardu SRPS U.M1.206:2013. Za ispitivanje su korišćeni uzorci betona oblika kocke ivice 100 mm koji su do dostizanja starosti od 28 dana negovani u ambijentalnim uslovima, umotani u plastičnu foliju. Po dostizanju starosti uzorci su izlagani naizmeničnim ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja. Ukupan broj ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja bio je 200. Jedan ciklus se sastojao od zamrzavanja uzoraka u trajanju od 4 sata na temperaturi od  $-20 \pm 2$  °C i odmrzavanja uzoraka u vodi u trajanju od 4 sata na temperaturi od  $20 \pm 3$  °C. Ispitivanje je vršeno na po tri uzoraka svake betonske serije, dok su druga tri uzoraka služila kao referentni uzorci. Rezultati ispitivanja otpornosti prema dejstvu mraza dati su u tabeli 16.

*Tabela 16. Rezultati ispitivanja otpornosti betona na dejstvo mraza*

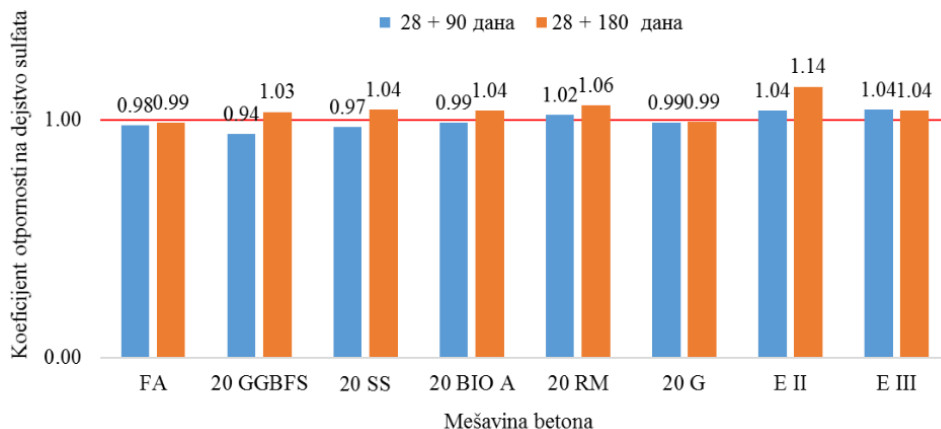
Oznaka mešavine	Uzorci negovani u amb. uslovima	Uzorci izlagani ciklusima zamrzavanja	Pad čvrstoće $\Delta f_p$	Klasa otpornosti na mraz
	$f_E$	$f_S$		
	MPa		%	
FA	56,98	43,85	77	M - 200
20 GGBFS	-	-	Lom nakon 120 ciklusa	-
20 SS	54,69	2,42	78	M - 200
20 BIO A	-	-	Lom nakon 30 ciklusa	-
20 RM	-	-	Lom nakon 90 ciklusa	-
20 G	-	-	Lom nakon 120 ciklusa	-
E II	59,22	58,52	99	M - 200
E III	55,17	53,72	97	M - 200
Prema standardu SRPS U.M1.206:2013: beton se smatra otpornim na zamrzavanje/odmrzavanje ako prosečna čvrstoća pri pritisku zamrzanih uzoraka iznosi min 75 % prosečne čvrstoće pri pritisku referentnih uzoraka istog sastava i ekvivalentne starosti. <b>M-100</b> – ispunjava uslove za klasu XF1 <b>M-200</b> - ispunjava uslove za klasu XF3				

Delimična zamena elektrofilterskog pepela drugim industrijskim nusproizvodima poput pepela drvene biomase, crvenog muljem, granulisanе zgre visoke peći i otpadnog stakla u procentno-masenom iznosu od 20 % uticala je na smanjenje otpornosti na dejstvo mraza. Fizičke promene na pojedinim uzorcima bila su vidljive već nakon 30 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja. Ovakvi rezultati ispitivanja mogu se povezati sa nepovoljnom strukturom pora formiranom prilikom očvršćavanja betona. Otpornim na dejstvo mraza mogu se smatrati jedino uzorci betona oznake „FA“ i „20 SS“. Kod uzoraka pomenutih betonskih mešavina zabeležen je pad čvrstoće ispitivanih uzoraka u odnosu na etalon za 12,27 MPa do 13,13 MPa, i „20 SS“. Ipak, prema standardu SRPS U.M1.206:2013 pomenute mešavine ispunjavaju uslove kvaliteta za klasu M-200.

### **3.6.9 Otpornost prema dejstvu sulfata**

Ispitivanje otpornosti prema dejstvu sulfata izvršeno je na uzorcima betona oblika kocke ivice 100 mm. Nakon dostizanja starosti od 28 dana uzorci betona su potopljeni u 5 % rastvor Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Ispitivanje otpornosti na dejstvo sulfata vršeno je nakon 3 i 6 meseci od početka ispitivanja. Tri uzoraka svake betonske serije izlagani su dejstvu sulfata, dok su druga tri uzoraka betona istog sastava služili kao referentni uzorci. Ispitivanje je

sprovedeno prema preporukama iz Izveštaja CEN/TR 15697:2014, a rezultati ispitivanja dati su na slici 15. Izgled uzoraka nakon 6 meseci od početka ispitivanja dat je na slici 16.



**Slika 15.** Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo sulfata nakon 3 i 6 meseci

Ispitivane geopolimerne betonske mešavine na bazi elektrofilterskog pepela pokazale su izuzetnu otpornost na dejstvo 5 % rastvora sulfata u trajanju od 3 i 6 meseci. Koeficijenti otpornosti na dejstvo sulfata nakon 3 i 6 meseci od potapanja uzoraka u sulfatni rastvor kretali su se u opsegu od 0,94 do 1,06. U skladu sa Izveštajem CEN/TR 15697:2014 svi ispitivani uzorci spadaju u grupu sulfatootpornih betona, a odnos čvrstoće pri pritisku uzoraka koji su izlagani dejstvu sulfatnog rastvora i referentnih uzoraka istog sastava i ekvivalentne starosti bio je veći od 0,8 (80 %).



**Slika 16.** Izgled uzoraka geopolimernog etalona oznake „FA“: levo referentni uzorak, desno uzorak nakon 6 meseci od potapanja u 5 % rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

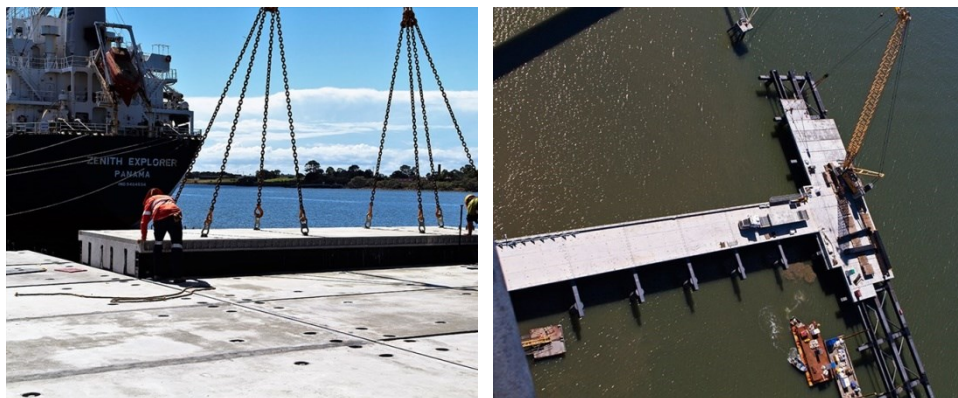
## 4. ZAKLJUČAK

Poznato je da je tradicionalni beton najkorišćeniji građevinski materijal. Za njegovo spravljanje cement je ključni sastojak. Cement zagađuje životnu sredinu sa oko 7 % ukupno generisanog CO<sub>2</sub>. Srbija ima tri fabrike cementa, a samo jedna od njih je usled infrastrukturne ekspanzije protekle godine prodala 450000 tona cementa. Da stvar bude još više zabrinjavajuća prava ekspanzija tek sledi prilikom uređenja železničkih pruga, novih autoputeva, rezervoara, sanacija brana, aerodroma i sl. Pri proizvodnji betona moguće je izvršiti parcijalnu zamenu cementa elektrofilterskim pepelom. Međutim, privredni sektor se tome opire i navodi da visok sadržaj organskih materija utiče na kvalitet finalnog proizvoda. To dalje zahteva upotrebu specijalnih aditiva pri spravljanju betona koji bi neutralisali ovaj efekat. To naravno poskupljuje cenu finalnog proizvoda i komplikuje proces spravljanja. Strategija Evropske Unije o prevenciji i reciklaži otpada osmišljena je sa ciljem da se otpad koristi kao resurs i to za dobijanje drugih sirovina, kompozita ili energije, a što je u skladu i sa idejom cirkularne ekonomije.

Kako cementnoj industriji, a ni investitorima i izvođačima radova, nije moguće nametnuti upotrebu industrijskih nusproizvoda koje bi koristili pri spravljanju betona, može se izvršiti plasiranje gotovih građevinskih proizvoda spravljenih isključivo od otpadnih materijala. U ovu svrhu mogao bi se upotrebiti geopolimerni betona za čije se spravljanje ne koristi cement već isključivo elektrofilterski pepeo ili drugi industrijski nusproizvodi. Geopolimerni gotovi proizvodi poput betonskih blokova tipa behaton, ivičnjaka, rigola i drugih elemenata čija je namena odvod atmosferskih voda i kanalizacije zatim betonski pragovi koji se koriste u železničkom i metro saobraćaju, bandere i dr. isporučuju se gradilištima širom zemlje u obliku pripremljenom za ugradnju. Efekat korišćenja geopolimera za pripremu ovih gotovih elemenata ogledao bi se u iskorišćenju upotrebne vrednosti industrijskih nusproizvoda koji se na svakodnevnom nivou generišu i deponuju na tlu naše zemlje. Poznato je da u poslednje vreme i u svetu, sve više pažnje privlače takvi betonski elementi. Kako su predmetni geopolimerni betoni pokazali dobru otpornost na dejstvo sulfata i habanje mogli bi se koristiti kao betoni za spravljanje betonskih ploča, blokova, odvodnih kanala ili podzemnih delova objekata koji neće biti izloženi dejstvu ekstremno niskih temperatura.

Trenutni lider u implementaciji geopolimera je Australija sa težnjom da postane globalni inovator u ovoj oblasti. Ipak, ni tamo praktična implementacija ne pritiče bez velikih problema, pa bi za još širu

komercijalizaciju bilo potrebno promeniti društvene stavove po pitanju geopolimera. Primera dobre prakse u primeni geopolimera u svetu ima mnogo. Uglavnom je to u primeni gotovih elemenata (Slika 17) koji se spravljaju u fabrikama i gotovi isporučuju na teren (rigole, pristaništa na rekama i drugi brojni primeri).



*Slika 17. Ugradnja geopolimernih gotovih panela na pristaništu reke Brisbane u Pinkenbi [29]*

Da bi se istraživanja na geopolimerima i praktično potvrdila na više primera nego do sada potrebno je proširiti postojeće zakonske regulative i standarde kojima bi se definisala njihova upotreba. Praktična primena geopolimera mogla bi biti i u polju mikroarmiranog betona. Naime, kako je utvrđena dobra otpornost na habanje, postoji realna mogućnost izlaganja geopolimernog betona veoma teškom opterećenju poput aerodromskih pisti, industrijskih hala i dr. pa bi pored gotovih građevinskih proizvoda od praktičnog značaja bilo i spravljanje geopolimernog betona sa dodatkom polipropilenskih i čeličnih vlakana.

Prethodno izložene naučne osnove čine da ovo rešenje „zvuči“ kompleksno i teško za tržišnu implementaciju međutim to baš i nije tako. Primenom ovog realnog rešenja renomirani proizvođači betonske galanterije mogli bi unaprediti svoje postojeće proizvodne linije. Postojeća postrojenja za proizvodnju betonskih blokova, ivičnjaka i rigola od Portland cementa bi se mogla koristiti za proizvodnju elemenata od geopolimera. Potrebne količine komponenti za spravljanje geopolimernih betonskih ploča bi se automatski dozirale i sipale u čelične kalupove određenih dimenzija. U zavisnosti od dimenzija proizvod bi bio kategorisan kao blok ili ploča tako da ispunjava uslove prema standardima EN 1338 i EN 1339. Ugradnja bi se mogla vršiti punjenjem osnovnog sloja betona koji bi bio

zbijanje jednovremenim vibriranjem i presovanjem. U drugom koraku bi se dozirale komponente za završni – vidljivi sloj betonskih blokova i ploča pri čemu bi se proces vibriranja i presovanja još jednom ponavljao. Geopolimerni betonski blokovi bi se mogli proizvoditi u standardnim dimenzijama 210×115×80 mm i 300×165×80 mm, kao i u obliku ploče dimenzija 390×165×80 mm, 480×16×80 mm, 540×115×80 mm i 630×115×80 mm. Nadogradnja postojećih linija bi se mogla izvršiti dodavanjem silosa za skladištenje sirovina koje se koriste za proizvodnju geopolimernih betonskih elemenata. Skladištenje, distribucija i ugradnja proizvedenih geopolimernih elemenata na tržište bi se vršila na isti način kao što se sada distribuiraju elementi od Portland cementa.

Na osnovu prethodno izloženih rezultata dobijenih eksperimentalnim istraživanjem mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Prema rezultatima ispitivanja konzistencije zaključuje se da najveći uticaj na rasprostiranje maltera ima elektrofilterski pepeo, dok ostali industrijski nusproizvodi utiču u manjoj meri. Smanjenjem sadržaja elektrofilterskog pepela u vezivu smanjuje se i potreba za vodom i superplastifikatorom. Takođe, smanjeni udeo elektrofilterskog pepela u vezivu utiče na povećanje mere obradljivosti maltera.

- Na osnovu rezultata ispitivanja zapreminske mase svežeg maltera može se zaključiti da se ona menja usled promene sadržaja elektrofilterskog pepela. Takođe, može se zaključiti da postoji direktna povezanost specifične mase korišćenog veziva i zapreminske mase maltera u svežem stanju.

- Pri ranim starostima maltera vrednosti čvrstoće pri pritisku su male dok je više od 90 % ukupnih čvrstoća ostvareno pri starosti maltera od 56 dana. Smatra se da je polimerizacija geopolimernog veziva skoro u potpunosti završena već pri starosti maltera od 56 dana.

- Najveći porast čvrstoće pri savijanju maltera ostvaren je između 7. i 28. dana. Nakon toga prirast i dalje postoji ali on nije toliko dominantan kao pri ranim starostima maltera.

- Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke malterskih prizmi prati promenu čvrstoće pri pritisku u toku vremena. To se potvrđuje i visokim koeficijentima korelacije  $R^2$  koji se kreću u opsegu od 0,8026 do 0,9967.

- Svi geopolimerni i cementni malteri ispunjavaju osnovne zahteve i smatraju se otpornim na dejstvo mraza u trajanju od 25 ciklusa. Najmanji koeficijent otpornosti izmeren je na uzorcima maltera oznake „100

GGBFS“, dok je koeficijent otpornosti bio najveći na uzorcima etalona oznake „FA“. Ovo se može protumačiti time da je N-A-S-H gel, koji je dominantan u etalonu, otporniji od C-(A)-S-H gela koji je dominantan kod uzoraka spravljenih sa granulisanom zgurom.

- Nakon potapanja uzoraka u 5 % rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u trajanju od 180 dana geopolimerni malter je nastavio da očvršćava. Stvorene polimerne veze su održale svoju stabilnost, a proces polimerizacije je nastavio da se razvija sve do kraja ispitivanja.

- Zamena elektrofilterskog pepela drugim industrijskim nusproizvodima uticala je na povećanje mere rasprostiranja betona. Ovo se može protumačiti time da se smanjenjem sadržaja elektrofilterskog pepela u vezivu smanjuje sadržaj sitnih čestica u vezivu.

- Početne vrednosti čvrstoće pri pritisku geopolimernog betona su male, ali one tokom vremena rastu i dosežu maksimalne vrednosti pri starosti od 90 dana.

- Zamena elektrofilterskog pepela drugim industrijskim nusproizvodima uticala je na povećanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem i čvrstoću pri zatezanju cepanjem u odnosu na etalon „FA“. Pri ispitivanju savijanja, čvrstoće betona kod kojeg je izvršena delimična zamena osnovnog veziva drugim industrijskim nusproizvodima bile su do 11,74 % veće od etalona, dok je kod ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem ova razlika dosegala čak 22,28 %.

- Zamena dela elektrofilterskog pepela drugim industrijskim nusproizvodima uticala je na promenu čvrstoće pri zatezanju čupanjem metodom „Pull-off“. Čvrstoća geopolimerih mešavina kod kojih je izvršena delimična zamena elektrofilterskog pepela drugim industrijskim nusproizvodima bila je i do 31,38% veća od etalona. Ipak, izuzetak je mešavina spravljena sa crvenim muljem čija je čvrstoća pri zatezanju metodom „Pull-off“ bila 3,77 % manja od etalona „FA“.

- Prema veličini indeksa odskočnog broja sklerometra može se zaključiti da ispitivani geopolimerni betoni spadaju u grupu veoma kvalitetnih betona. Indeks odskoka sklerometra može se koristiti kao dovoljno pouzdana nedestruktivna metoda za praćenje promene čvrstoće pri pritisku.

- Delimična zamena elektrofilterkog pepela drugim industrijskim nusproizvodima uticala je na smanjenje modula elastičnosti geopolimernog betona. Modul elastičnosti geopolimernog betona bio je znatno niži od



modula elastičnosti cementnog betona. Ovo se može protumačiti time da je modul elastičnosti geopolimerne paste znatno niži od modula elastičnosti cementne paste.

- Otpornim na dejstvo mraza smatraju se jedino uzorci geopolimernog etalon betona i uzorci betona spravljeni sa dodatkom konvertorske zgre. Na uzorcima geopolimernih betona spravljenih sa drugim dodacima fizičke promene su bile vidljive već nakon 30 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja. Na rezultate ispitivanja moglo bi se uticati dodavanjem aeranata prilikom spravljanja betona.

- Sve geopolimerne i cementne mešavine pokazale su dobru otpornost na dejstvo 5 % rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u trajanju od 3 i 6 meseci. Nakon izlaganja uzoraka sulfatnom dejstvu beton je nastavio da očvršćava, a geopolimerno vezivo i alkalni rastvor su održale svoje veze stabilnim i nisu reagovala na agresivne spoljašnje uticaje.

- Dalje istraživanje u ovoj oblasti moglo bi se usmeriti na razvoj kompjuterskog softvera za predikciju karakteristika geopolimera u zavisnosti od polaznih sirovina.

## 5. LITERATURA

- [1] J. Bijeljić, N. Ristić, Z. Grdić, G. Topličić – Ćurčić (2017), "*Alkali – silica reaction testing of mortar with added waste CRT glass*", International Symposium on Researching and Application of Contemporary Achievements in Civil Engineering in the Field of Materials and Structures", Vršac, p.p. 185-193
- [2] J. Bijeljić, N. Ristić, Z. Grdić, G. Topličić – Ćurčić, N. Stojković (2018), "*Influence of used waste cathode ray tube glass on alkali silicate reaction and mechanical properties of mortar mixtures*", Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering, Vol. 16, No3, p.p. 437-448
- [3] J. Bijeljić, M. Protić (2017), „*Regional construction waste management*” The sixth international conference Transport and logistics, Niš, p.p. 270-280
- [4] J. Bijeljić (2020), "*Mogućnost primene industrijskih nusproizvoda u geopolimernim malterima i betonima na bazi elektrofilterskog pepela*", doktorska disertacija
- [5] J. Bijeljić, S. Paunović, I. Nešović, B. Milošević (2014), „*Influence of calcined clays on the fresh properties of self-compacting concrete*” Journal of faculty of civil engineering, International

- Scientific Conference contemporary achievements in civil engineering – Subotica, p.p. 509-515
- [6] S. Marinković, M. Protić, S. Paunović, I. Nešović, J. Bijeljić (2018), *“Application of industrial by-products as mineral admixtures for self-compacting concrete”*, Journal Gradjevinar, 70 (1), p.p. 31-38,
- [7] J. Bijeljić, N. Ristić, Z. Grdić, G. Topličić-Ćurčić, D. Đorđević (2020), *“Durability Properties of Ladle Slag Geopolymer Mortar Based on Fly Ash”*, Science of Sintering, 52 (2), p.p. 231-243,
- [8] J. Bijeljić, N. Ristić, Z. Grdić, G. Topličić - Ćurčić, D. Grdić, D. Krstić (2018), *“Effects of ground granulated blast furnace slag on physical – mechanical characteristics of geopolymer mortars based on fly ash”*, The 14th International Scientific Conference with Subconference "Eco build", Novi Sad, 21-23 November, p.p 1231–1240
- [9] D. Grdić, N. Ristić, G. Topličić - Ćurčić, J. Bijeljić, Z. Grdić (2021) *“Resistance of concrete made with finely milled cathode ray tube glass as a supplementary cementitious materials to sulphate attack“*, 2nd International conference COMS, Slovenia
- [10] N. Ristić, J. Bijeljić, Z. Grdić, G. Topličić-Ćurčić, D. Grdić (2019), *“Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje geopolimernih maltera na bazi elektrofilterskog pepela sa dodatkom crvenog mulja”*, prihvaćen rad za štampu u časopisu "Nauka+Praksa", Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, br. 22/2019, ISSN 1451-8341
- [11] J. Bijeljić, N. Ristić, G. Topličić – Ćurčić, Z. Grdić, D. Grdić, D. Krstić (2019), *“Freeze – thaw resistance of geopolymer mortar based on industrial byproducts”*, V International Symposium for Students of Doctoral Studies in the Fields of Civil Engineering, Architecture and Environmental Protection PhIDAC, Nis, Serbia, p.p. 312-381
- [12] J. Bijeljić, N. Ristić, Z. Grdić, G. Topličić - Ćurčić, D. Grdić (2019), *“Impact of by-products on characteristics of geopolymer mortar mixtures”*, Journal of faculty of civil engineering, 7th International Scientific Conference contemporary achievements in civil eng., Subotica, p.p. 505-514
- [13] URL:[https://www.geopolymer.org/fichiers\\_pdf/30YearsGEOP.pdf](https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/30YearsGEOP.pdf)(p ristupljeno 21.5.2020.)
- [14] P. Duxson, A. F.-Jimenez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, J. S. J. van Deventer (2007): *“Geopolymer technology: the current state of the art”*, Journal of material science, Vol. 42, pp. 2917-2933

- [15] J. L. Provis, J. S. J. van Deventer: *"Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications"*, Woodhead publishing ISBN 978-1-84569-449-4
- [16] J. L. Provis, J. S. J. van Deventer (2014): *"Alkali activated materials state-of-the-art report"*, Rilem TC 224-AAM"
- [17] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, G. D. Corder (2011): *"Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement"*, Journal of cleaner production, Vol.19, pp. 1080-1090
- [18] N. Marjanović, M. Komljenović, Z. Bašcarević, V. Nikolić, R. Petrović (2014): *"Physical-mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-blast furnace slag blends"*, Ceramics international, Vol.41,pp.1421-1435
- [19] A. Palomo, P. Krivenko, I. G. Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva, A. F. Jimenez (2014): *"A review on alkaline activation: new analytical perspectives"*, Materiales de construcción, Vol. 64 (315)
- [20] J. L. Provis, S. A. Bernal (2014): *"Geopolymers and related alkali-activated materials"*, Annual review of materials research,
- [21] M. Životić, D. Stojiljković, A. Jovović, V. Čudić (2012): *"Mogućnost korišćenja pepela i šljake sa deponije termoelektrane „Nikola Tesla“ kao otpada sa upotrebnom vrednošću"*, Hemijska industrija, Vol.66 (3),p.p.403-412
- [22] A. Džananović, N. Manić (2018):*"Mogućnost upotrebe zgure visoke peći kao agregata u betonu"*,Građevinski materijali i konstr.,Vol.61(3),pp.67-78
- [23] V.Maruthachalam,M.Palanisamy(2014):*"Beton visokih uporabnih svojstava sa čeličanskom zgurom kao agregatom"*,Građevinar,Vol.66
- [24] T. Kosanić (2015): *"Uticaj procesnih parametara na pirolizu drvne biomase"*, doktorska disertacija,
- [25] P. Wang, D. Y. Liu (2012): *"Physical and chemical properties of sintering red mud and Bayer red mud and the implications for beneficial utilization"*, Materials, Vol. 5, pp. 180-1810
- [26] M. Čeček, M. Š. Išović (2019): *"Mortovi s dodatkom lokalnih industrijskih proizvoda"*, Građevinar, Vol. 71(1), pp. 1-7
- [27] V. F. F. Barbosa, K. J. D.MacKenzie, C. Thaumaturgo (2000): *"Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers"*, International journal of inorganic materials, Vol. 2, pp. 309-317

- [28] F. S. Pierre, A. Philibert, B. Giroux, P. Rivard (2016): „*Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity*“, Construction and building materials, Vol. 125, pp. 1022-1027
- [29] <https://www.wagner.com.au/main/our-projects/pinkenba-wharf/>  
(pristupljeno 24.8.2023.)