

# OTPORNOST NA SMRZAVANJE I ODMRZAVANJE GEOPOLIMERNIH MALTERA NA BAZI ELEKTROFILTERSKOG PEPELA SA DODATKOM CRVENOG MULJA

UDK : 666.972.16  
666.9.015

Nenad Ristić<sup>1</sup>, Jelena Bijeljić<sup>2</sup>  
Zoran Grdić<sup>3</sup>, Gordana Topličić-Ćurčić<sup>4</sup>, Dušan Grdić<sup>5</sup>

**Rezime:** Geopolimeri su kompozitni materijali koji nastaju hemijskim procesom zvanog geopolimerizacija, kojom se amorfna faza polaznog materijala transformiše u vezivni materijal. Ovako formirani materijal nakon očvršćavanja formira kompaktnu strukturu. Geopolimerizacija predstavlja reakciju čvrstog veziva – alumosilikatnog materijala u vidu prirodnih materijala poput gline, kao i otpadnih nus proizvoda poput elektrofilterskog pepela, granulirane zgure, metakaolina, crvenog mulja i dr. i alkalnih rastvora – aktivatora u tečnom stanju, poput jakih baza NaOH ili KOH u kombinaciji sa Na<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub> ili K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. U ovom radu su ispitivane karakteristike geopolimernih malterskih mešavina na bazi elektrofilterskog pepela sa dodatkom crvenog mulja. Napravljeno je ukupno pet različitih malterskih mešavina sa različitim procentualno - masenim udelom crvenog mulja od 0, 5, 10, 15 i 20 %. Sve mešavine su imale isti odnos vode i veziva, kao i odnos veziva i agregata. Uzorci su negovani na vazduhu na temperaturi od 20±2°C. Sprovedeno je ispitivanje pritisne i savojne čvrstoće pri starosti uzoraka od 3, 7, 28, 56 i 90 dana, kao i praćenje njihovog ponašanja tokom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Određivanjem koeficijenta otpornosti na dejstvo mraza u pogledu savojnih i pritisnih čvrstoća u trajanju od 25 ciklusa, došlo se do zaključka da su sve geopolimerne malterske mešavine otporne na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

**Ključne reči:** geopolimerni malter, elektrofilterski pepeo, crveni mulj, mehaničke karakteristike, otpornost na smrzavanje i odmrzavanje

## FREEZE – THAW RESISTANCE OF GEOPOLYMER MORTAR BASED ON FLY ASH WITH ADDITION RED MUD

**Abstract:** Geopolymers are composite materials created using a chemical process called geopolymerization, which transforms the amorphous phase of the initial material into a binding material. The material formed in this way, after setting forms a compact structure. Geopolymerization represents a reaction of solid binder – alumosilicate material in the form of natural materials such as clay, as well as waste by-products such as fly ash, granulated slag, metakaolin, red mud etc. and alkali solutions – activators in liquid state, such as strong bases NaOH or KOH in combination with Na<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub> or K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. This paper studied the characteristics of geopolymer mortar mixture based on the fly ash with red mud admixture. A total of five different mortar mixtures were made, each having a different mass and percentage share of red mud of 0, 5, 10, 15 or 20 %. All mixtures had the same ratio of water and binder, and of binder and aggregate. The specimens were cured in air at 20±20C. A test of compressive and flexural strength at the specimen age of 3, 7, 28, 56 and 90 days was conducted, and the behavior of specimens was monitored as they were exposed to freeze-thaw cycles. The established freeze-thaw resistance coefficient regarding flexural and compressive strength after 25 cycles lead to the conclusion that all geopolymer mortar mixtures are resistant to freezing and thawing cycles.

**Key words:** geopolymer mortar, fly ash, red mud, mechanical properties, freeze – thaw resistance

<sup>1</sup> docent, dr Nenad Ristić, dipl. građ. inž., Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu

<sup>2</sup> doktorand, Jelena Bijeljić, dipl. građ. inž., Visoka tehnička škola strukovnih studija Niš

<sup>3</sup> profesor, dr Zoran Grdić, dipl. građ. inž., Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu

profesor, dr Gordana Topličić-Ćurčić, dipl. građ. inž., Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu

asistent, Dušan Grdić, dipl. građ. inž., Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu

## 1. UVOD

Poslednjih godina sve su više u fokusu pažnje ekološki materijali. Veza između ekoloških i građevinskih materijala uspešno se može uspostaviti pomoću geopolimera. Geopolimeri su kompozitni materijali čije su karakteristike slične tradicionalnim cementnim mešavinama.

Geopolimeri ili alkalima aktivirani materijali, baziraju se na aluminosilikatnim materijalima. Emisija CO<sub>2</sub> za njihovo dobijanje je mnogostruko manja nego kod tradicionalnih materijala na bazi cementa. Ovi kompoziti uglavnom se baziraju na otpadnim nusproizvodima, najčešće poreklom iz industrijske proizvodnje, a njihove mehaničke karakteristike i trajnost su slične kao kod cementnih kompozita [1-2].

Do sada je veliki broj autora ispitivao mogućnost primene raznih nusproizvoda za spravljanje geopolimernih maltera pri čemu su ispitivane njihove fizičke, mehaničke i druge karakteristike. U dosadašnjim istraživanjima obuhvaćena je i mogućnost primene crvenog mulja (RM) kao sekundarnog veziva tj. kao delimične zamene elektrofilterskog pepela (FA), zgura iz visokih peći (BFS), metakaolina (MK) i dr. i njegov uticaj na karakteristike geopolimernog maltera spravljenog s njim. Jian He i dr. [3] ispitivali su dva tipa geopolimernih mešavina i to: mešavinu spravljenju na bazi MK i mešavinu spravljenju na bazi FA i RM. Prema rezultatima ispitivanja mehaničkih karakteristika, autori navode da je na mešavini spravljenju sa MK izmerene bolje mehaničke karakteristike i da su one povezane sa reaktivnošću materijala. M. Zang i dr. [4] ispitivali su fizičke, mehaničke i mikrostrukturalne karakteristike geopolimernih mešavina spravljenih sa RM i FA klase F koje su ambijentalno očvršćavale. Takođe, vršena je varijacija odnosa Si/Al i Na/Al u korišćenom vezivnom materijalu. Izmerena pritisna čvrstoća ispitivanih uzoraka iznosila je 11,3 do 21,3 MPa. K. Kaya dr. [5] su ispitivali karakteristike geopolimera na bazi MK i pri različitom procentualnom udelu RM (0 do 40 %). Ispitivane su karakteristike poput XRD, FTIR, SEM i pritisne čvrstoće kako bi se se utvrdio tačan uticaj strukture materijala na karakteristike kompozita. Najveću pritisnu čvrstoću ostvarila je mešavina na bazi MK (51,5 MPa), dok se dodatkom i povećanjem procentualnog sadržaja RM pritisne čvrstoće smanjuju. Z. Pan i ostali [6] ispitivali su mehaničke, mikrostrukturalne i karakteristike trajnosti geopolimerne paste spravljenju na bazi BFS i sa dodatkom 30% RM. Prema rezultatima ispitivanja,

geopolimerna mešavina se pokazala kao izuzetno otporna na dejstvo spoljašnjih hemijskih rastvora i dejstvo mraza. Takođe, Degirmenci [7] je istraživala otpornost na dejstvo mraza i promene poput promene mase i pritisne čvrstoće na geopolimernim malterima u trajanju od 25 ciklusa. Kao rezultat, ostvarena pritisna čvrstoća svih malterskih mešavina ispitivanih na dejstvo mraza u trajanju od 25 ciklusa bila je manja od etalon uzoraka istog sastava koji su za vreme trajanja ispitivanja negovani u laboratorijskim uslovima.

U ovom radu ispitivana je mogućnost primene crvenog mulja kao sekundarnog vezivnog materijala za spravljanje geopolimera. Ispitivani malter spravljen je na bazi elektrofilterskog pepela pri čemu je izvršena delimična zamena osnovnog veziva crvenim muljem pri procentualno-masenom udelu 5 do 20 %, sa korakom zamene od 5%. Ispitivane su mehaničke karakteristike maltera i otpornost na dejstvo mraza usled naizmeničnih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

## 2. PROGRAM ISPITIVANJA

U ovom radu su kao vezivni materijali za spravljanje geopolimernog maltera korišćeni FA i RM. FA je nusproizvod poreklom iz termoelektrane Kostolac "B" u Kostolcu (Srbija), dok je RM nusproizvod nastao pri preradi aluminijuma poreklom iz "Kombinat aluminijuma" Podgorica, (Crna Gora). FA i RM su najpre osušeni do konstantne mase, a zatim su prosejani kroz laboratorijsko sito otvora 0.09 mm. Korišćeni vezivni materijali prikazani su na Slici 1. Agregat za spravljanje maltera je iz Južne Morave maksimalnog prečnika zrna od 2mm.



Slika 1. Korišćeni vezivni materijali: elektrofilterski pepeo (levo), crveni mulj (desno)

Primenom metode potresnog stola praćeno je rasprostiranje malterskih mešavina u svežem stanju. Programom ispitivanja je predviđeno da sve malterske mešavine imaju približno isto rasprostiranje od oko 140 mm što je postignuto korišćenjem superplastifikatora Sika Visco Crete 5380.

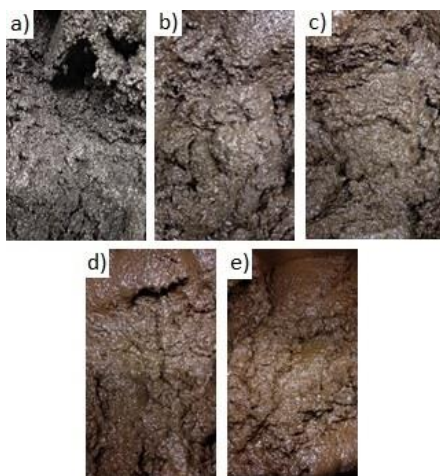
Tabela 1 – Hemijski sastav (wt%) korišćenih vezivnih materijala

Hemijsko jedinjenje	FA	RM
SiO <sub>2</sub>	51,70	32,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,60	4,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,20	9,92
CaO	7,40	2,37
MgO	2,40	0,22
SO <sub>3</sub>	1,02	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	-
TiO <sub>2</sub>	1,04	-
Na <sub>2</sub> O	0,80	0,12
K <sub>2</sub> O	1,04	0,12

Hemijski sastav korišćenih vezivnih materijala prikazan je u Tabeli 1. Sastav je određen hemijskom analizom prema odredbama standarda ASTM C618 [8]. Korišćeni alkalni aktivatori su: natrijumhidroksid – (SH) u obliku granula proizvođača Oltchim, (Rumunija), čistoće 98,5%, i natrijumsilikat – (SS) u tečnom stanju proizvođača Galenika-Magmasil d.o.o. (Srbija) sa odnosom sadržaja SiO<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>O=1:2. Za spravljanje mešavina, korišćen je SH koncentracije 10 M koja je dobijena rastvaranjem granula u vodi.

## 2.1. Priprema geopolimernog maltera

Spravljen je i ispitivano pet geopolimernih malterskih mešavina. Jedna mešavina spravljen je sa 100% elektrofilterskog pepela, dok je kod ostalih izvršena procentualno-masena zamena osnovnog veziva sa crvenim muljem u iznosu 5 do 20 % sa korakom zamene od 5%. Shodno procentualnom sadržaju RM u mešavinama one su označene: „0 RM“, „5 RM“, „10 RM“, „15 RM“ i „20 RM“.



Slika 2. Izgled geopolimernih malterskih mešavina u svežem stanju: a) „0 RM“, b) „5 RM“, c) „10 RM“, d) „15 RM“ i e) „20 RM“

Spravljanje malterskih mešavina izvršeno je u laboratorijskom mikseru. Maseni odnos vezivnih materijala i peska bio 1:3. Sjedinjavanje alkalnih aktivatora tj. SS i SH izvršeno je 30 minuta pre početka ispitivanja, dok je rastvaranje granula SH u vodi izvršeno 24 časa pre početka spravljanja maltera. Nakon sjedinjavanja aktivatora izvršeno je dodavanje prethodno pripremljenog vezivnog materijala. Mešanje paste u laboratorijskom mikseru je trajalo 5 minuta, nakon čega je usledilo dodavanje agregata. Mešanje je nastavljeno još 5 minuta. Sastav malterskih mešavina dat je u Tabeli 2, dok je izgled mešavina zabeležen neposredno nakon spravljanja prikazan na Slici 2.

Nakon spravljanja, svež malter je ugrađen u metalne kalupe dimenzija 4 x 4 x 16 cm. Kalupi su zatim umotani u plastičnu foliju. Nakon 2 dana uzorci su izvađeni iz kalupa. Uzorci su do vremena ispitivanja čuvani na laboratorijskoj temperaturi od 20±2°C. Uzorci su bili umotani u plastičnu foliju kako bi se sprečio gubitak vlage.

Tabela 2 – Sastav geopolimernih mešavina

Mešavina	FA [g]	RM [g]	SH/SS	W/B	B/S	SP [%]	Voda [g]
0 RM	450	0	0,19	0,45	1:3	2	20
5 RM	427,5	22,5	0,19	0,45	1:3	0,5	20
10 RM	405	45	0,19	0,45	1:3	0,3	20
15 RM	382,5	67,5	0,19	0,45	1:3	0,1	20
20 RM	360	90	0,19	0,45	1:3	-	20

\*FA – elektrofilterski pepeo, RM – crveni mulj, SS – natrijumsilikat, SH – natrijumhidroksid, B – vezivo, S – pesak, SP - superplastifikator

## 2.2. Ispitivanje maltera

Mehaničke karakteristike geopolimernih malterskih mešavina ispitivane su na uzorcima oblika prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm i starosti 3, 7, 28, 56 i 90 dana. Ispitivanje je vršeno prema standardu SRPS EN 196-1 [9]. Za svaku maltersku mešavinu napravljeno je ukupno petnaest prizmi. Ispitivanje savojne čvrstoće vršeno je na tri uzoraka pri svim starostima, a ispitivanje pritisne čvrstoće izvršeno na polovinama uzoraka dobijenih nakon ispitivanja savijanjem.

Za svaku maltersku mešavinu ispitana je i otpornost na dejstvo mraza. Ispitivanje je vršeno na malterskim epruvetama dimenzija 4 x 4 x 16 cm pri čemu je praćena promena pritisne i savojne čvrstoće. Za svaku mešavinu ispitivano je po šest prizmi. Tri malterske prizme izlagane su ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, dok su ostale tri čuvane u ambijentalnim uslovima. Jedan ciklus ispitivanja sastoji se od naizmeničnog smrzavanja u komori i odmrzavanja uzoraka u vodi. Smrzavanje uzoraka vršeno je u trajanju od 4 sata na temperaturi od  $-20\pm 5$  °C, nakon čega su uzorci potopljeni u vodu na temperaturi  $20\pm 5$  °C. Ciklus odmrzavanja trajao je 4 sata. Test je sproveden prema standardu SRPS EN 14617-5 [10] u trajanju od 25 ciklusa. Po sprovedenom testu ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza na epruvetama je određena pritisna i savojna čvrstoća. Rezultati ispitivanja predstavljeni su koeficijentima  $KM_{f25}$  i  $KM_{c25}$  koji su sračunati prema sledećim izrazima:

$$KM_{f25} = \frac{RMf}{Rf} \quad (1)$$

$$KM_{c25} = \frac{RMc}{Rc} \quad (2)$$

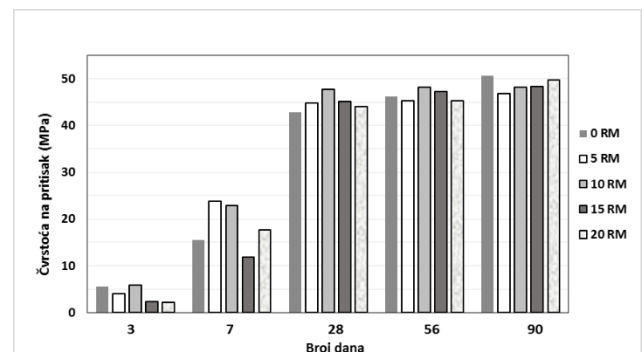
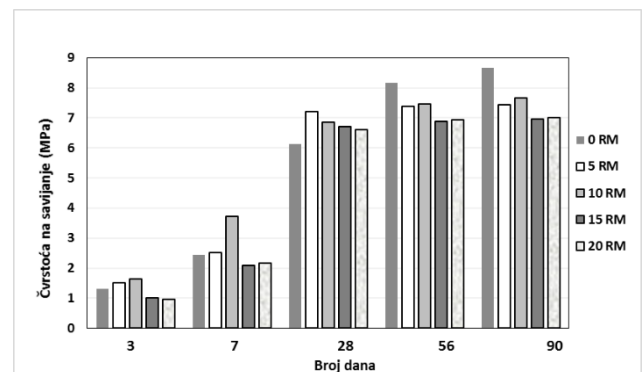
Gde je:

- $KM_{f25}$  - Koeficijent otpornosti savojne čvrstoće nakon izlaganja uzoraka 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (%)
- $KM_{c25}$  - Koeficijent otpornosti pritisne čvrstoće nakon izlaganja uzoraka 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (%)
- $RMf$  - ostvarena savojna čvrstoća nakon izlaganja uzoraka 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja,
- $Rf$  – ostvarena savojna čvrstoća etalon uzoraka mešavine istog sastava koje nisu izlagani ciklusima smrzavanja i odmrzavanja,
- $RMc$  - ostvarena pritisna čvrstoća nakon izlaganja uzoraka 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja,
- $Rc$  - ostvarena pritisna čvrstoća etalon uzoraka mešavine istog sastava koje nisu izlagani ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.

### 3 REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA

Rezultati ispitivanja pritisne i savojne čvrstoće geopolimernih maltera pri starosti od 3, 7, 28, 56 i 90 dana prikazani su na Slici 3.

Može se zaključiti da se sa povećanjem starosti uzoraka povećavaju i čvrstoće geopolimernog maltera. Pri starosti uzoraka od 3 dana najveću savojnu čvrstoću imala je mešavina „10 RM. Savojne čvrstoće pri starosti od 7 i 28 dana za mešavinu „10 RM“ iznosile su 3,73 MPa i 6,87 MPa, respektivno, dok su kod etalon mešavine „0 RM“ one iznosile 2,45 MPa i 6,13 MPa. Pri starosti uzoraka od 28 dana najveća vrednost savojne čvrstoće izmerena je kod mešavine „5 RM“ i iznosila je 7,2 MPa, dok je ona najniža bila kod mešavine „0 RM“. Pri starosti uzoraka od 56 i 90 dana, najveće vrednosti izmerena su kod mešavine „0 RM“ i iznosile su 8,16 MPa i 8,67 MPa, respektivno.



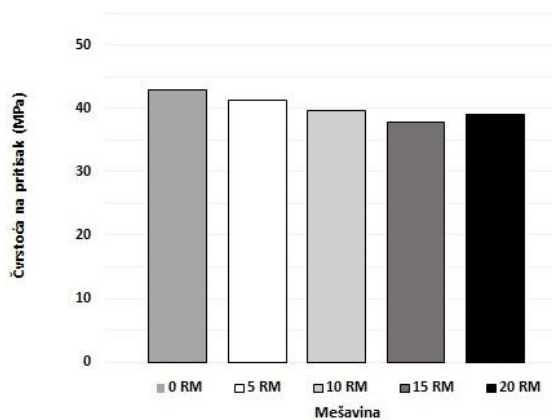
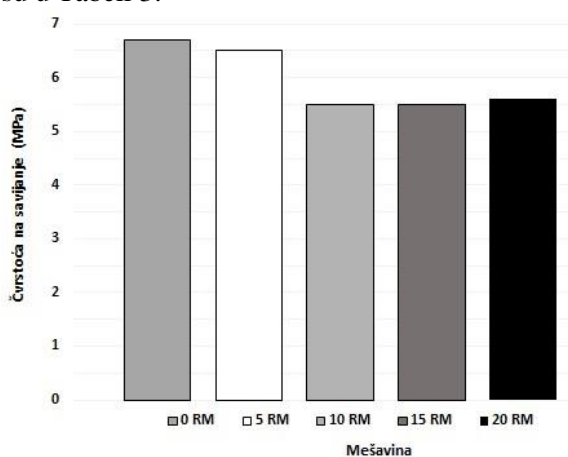
Slika 3 – Čvrstoća na savijanje (gore) i čvrstoća na pritisak (dole) geopolimernih mešavina na bazi elektrofilterskog pepela i sa dodatkom crvenog mulja pri starosti od 3, 7, 28, 56 i 90 dana

Prilikom ispitivanja pritisne čvrstoće pri starosti uzoraka od 3 dana najveća vrednost izmerena je kod mešavine „10 RM i iznosila je 5,79MPa, što je tek za 0,18 MPa više od etalona „0 RM“. Pri starosti epruveta od 28 dana najveća vrednost pritisne čvrstoće izmerena je kod mešavine „10 RM“ i iznosila je 47,82

MPa što je za oko 11 % više od etalona „0 RM“. Treba napomenuti da je oblik dijagrama pritisnih čvrstoća pri starosti uzoraka od 28 i 56 dana je sličan za mešavine koje sadrže RM. Takođe, kod mešavine „0 RM“ pri starosti od 56 dana zabeležen je prirast pritisne čvrstoće u odnosu na čvrstoću merenu pri starosti od 28 dana i iznosila je 46,27 MPa.

Može se zaključiti da su sve geopolimerne malterske mešavine imale male rane čvrstoće. Najveći prirast čvrstoća je zabeležen između 7. i 28. dana. Postoji prirast čvrstoća i pri većim starostima, ali je on najdominantniji kod etalon mešavine „0 RM“ spravljene samo sa FA. Generalno, u pogledu savojnih i pritisnih čvrstoća, sve geopolimerne malterske mešavine ispunjavaju propisane zahteve za klasu čvrstoće 42,5 prema SRPE EN 197-1 [11].

Rezultati ispitivanja savojne i pritisne čvrstoće nakon 25 ciklusa smrzavanja prikazani su Slici 4. Nakon merenja čvrstoće vršeno je i računanje koeficijenta otpornosti na dejstvo mraza u pogledu savojne i pritisne čvrstoće, a njihovi rezultati prikazani su u Tabeli 3.



Slika 4. Čvrstoća na savijanje i čvrstoća na pritisak geopolimernog maltera nakon izlaganja dejstvu mraza

Vrednosti koeficijenta otpornosti na dejstvo mraza u pogledu čvrstoće na savijanje kod svih malterskih mešavina sa dodatkom RM su manji u odnosu na etalon mešavinu. Najveći koeficijent, odnosno najbolju otpornost na dejstvo mraza od mešavina sa RM imala je mešavina „RM5“ (91%), dok je najmanju otpornost imala mešavina „RM10“ (80%). Generalno, koeficijenti otpornosti za sve mešavine su veće od 75% što znači da su svi ispitani uzorci otporni na dejstvo mraza.

Etalon mešavina „0RM“ i mešavina „5RM“ imale su iste vrednosti koeficijenta otpornosti na dejstvo mraza u pogledu čvrstoće na pritisak (92%), dok su koeficijenti otpornosti za ostale mešavine sa RM bile manje od etalona. Najmanju vrednost koeficijenta otpornosti (83%) imala je mešavina „10RM“. Kako su koeficijenti otpornosti za sve malterske mešavine veći od 75%, to znači da su svi uzorci otporni na 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

Tabela 3. Koeficijenti rezistentnosti geopolimernog maltera nakon izlaganja 25 ciklusa dejstva mraza

Parametar	0 RM	5 RM	10 RM	15 RM	20 RM
$KM_{f25}$	109	91	80	82	85
$KM_{c25}$	92	92	83	84	89

Generalno, može se zaključiti da su ispitivani uzorci geopolimernog maltera spravljani na bazi FA i sa dodatkom RM otporni na dejstvo mraza tj. na smrzavanje i odmrzavanje u trajanju od 25 ciklusa. Izgled uzoraka nakon izlaganja cikličnom dejstvu mraza prikazani su na Slici 5.

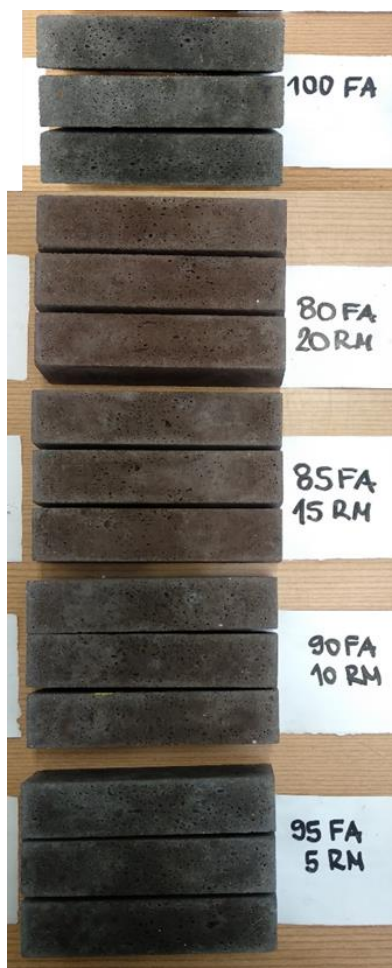
#### 4 ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata ispitivanja, može se zaključiti sledeće:

- Sve malterske mešavine imale su male vrednosti savojne i pritisne čvrstoće pri starosti od 3 dana.
- Pri starosti uzoraka od 28 dana svi ispitivani uzorci imali su pritisnu čvrstoću veću od 42,81 MPa, odnosno veću od 46,81 MPa pri starosti od 90 dana.
- Sve geopolimerne malterske mešavine ispunjavaju kriterijum za klasu čvrstoće 42,5 prema standardu SRPS EN 197-1.
- Koeficijent otpornosti na dejstvo mraza u pogledu savojnih čvrstoća veći je od 75 % kod

svih ispitivanih uzoraka nakon 25 cikusa smrzavanja i odmrzavanja.

- Koeficijent otpornosti na dejstvo mraza u pogledu pritisknih čvrstoća veći je od 75 % kod svih ispitivanih uzoraka nakon 25 cikusa smrzavanja i odmrzavanja.
- Ekološke i ekonomske prednosti korišćenja geopolimernih materijala ogledaju se u iskorišćenju otpada, kod kojeg je emisija CO<sub>2</sub> prilikom njegovog prevođenja iz nusproizvoda u vezivni materijal mala.
- Generalno, geopolimerni malteri na bazi elektrofilterskog pepela i sa dodatkom crvenog mulja mogu biti adekvatna zamena tradicionalnim cementnim mešavinama.
- Dalja istraživanja treba usmeriti na ispitivanje drugih osobina trajnosti geopolimernih maltera na bazi elektrofilterskog pepela, kao što je skupljanje usled sušenja, sulfatna otpornost itd.



Slika 5: Uzorci geopolimernog maltera nakon 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

## ZAHVALNOST

Ovaj rad predstavlja deo istraživanja obavljenog u okviru projekta TR 36017 – „Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji”, koji je podržalo Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije. Duboko smo zahvalni zbog te podrške.

## LITERATURA

- [1] Gokhan Gorhan, Gokhan Kurkiu: The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, *Composites: Part B*, Vol. 58, 2013, str. 371-377.
- [2] Sathonsaowaphak Apha, Chindaprasirt Prinya, Pimraksa Kedsarin: Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar, *Journal of hazardous materials*, Vol. 168, 2009, str. 44-50.
- [3] He Jian, Zhang Jianhong, Yu Yuzhen, Zhang Guoping: Strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study, *Construction and building materials*, Vol. 30, 2012, str. 80-91.
- [4] Zhang Mo, El-Korchi Tahar, Zhang Guoping, Liang Jianyu, Tao Mingjang: Synthesis factors affecting mechanical properties, microstructure and chemical composition of red mud-fly ash based geopolymers, *Fuel*, Vol. 134, 2014, str. 315-325.
- [5] Kaya Kardelen, Soyer – Uzun Sezen: Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud-metakaolin based geopolymer systems, *Ceramics international*, Vol. 42, 2016, str. 7406-7413.
- [6] Pan Zhihua, Li Dongxu, Yu Jian, Yang Nanru: Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material, *Cement and concrete research*, Vol. 33, 2003, str. 1437-1441.
- [7] F. N. Degirmenci, Freeze-thaw and fire resistance of geopolymer mortar based on natural and waste pozzolans, *Ceramics-Silikáty*, Vo. 62, No. 1, 2018, str. 41-49
- [8] ASTM C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- [9] SRPS EN 196-1:2018, Metode ispitivanja cementa – Deo 1: Određivanje čvrstoće.
- [10] SRPS EN 14617-5:2008, Veštački kamen - Metode ispitivanja - Deo 5: Određivanje otpornosti prema zamrzavanju i odmrzavanju
- [11] SRPS EN 197-1:2013 Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cimente