



**DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE  
MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE**



**INSTITUT IMS AD, BEOGRAD**



**UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



**INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE**

**Konferencija**  
**SAVREMENI MATERIJALI I**  
**KONSTRUKCIJE SA REGULATIVOM**

**Zbornik radova**

**Beograd, 17. jun 2016. godine**

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

691:66.017(082)  
620.1:691(082)

КОНФЕРЕНЦИЈА Савремени материјали и конструкције са  
регулативом (2016 ;  
Београд)

Zbornik radova / Konferencija Savremeni materijali i  
konstrukcije sa  
regulativom, Beograd 17. jun 2016. ; [organizatori] Društvo  
za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija  
Srbije ... [et al.] ; [editor Dragica Jevtić]. - Beograd :  
Društvo za ispitivanje i istraživanje i konstrukcija  
Srbije, 2016 (Đurinci : Atom štampa). - [10], 130 str. :  
ilustr. ; 25 cm

Radovi na srp. i engl. jeziku. - Str. [9-10]: Predgovor /  
Dragica Jevtić. - Tiraž 150. - Bibliografija uz svaki rad.  
- Rezimeji ; Summaries.

ISBN 978-86-87615-07-6

a) Грађевински материјали - Зборници  
COBISS.SR-ID 224025356

Izdavač: **Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije**  
Beograd, Kneza Miloša 9/I

Editor: **Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.**  
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd

Štampa: "Atom štampa" - Karađorđeva 81, 11450 Sopot

Tiraž: 150 primeraka

Konferenciju **SAVREMENI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE SA  
REGULATIVOM**, koja se održava u Beogradu 17. juna 2016. godine, organizovali su  
**Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije** i **Institut IMS**.

Skup je organizovan uz podršku: **MINISTARSTVA PROSVETE, NAUKE I  
TEHNOLOŠKOG RAZVOJA** i **INŽENJERSKE KOMORE SRBIJE**

Beograd, 17. jun 2016. godine

## **NAUČNI KOMITET**

1. Prof. dr Radomir Folić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
2. Prof. dr Dragoslav Stojić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
3. Prof. dr Mirjana Malešev, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
4. Vanr. prof. dr Gordana Topličić-Ćurčić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
5. Dr Zagorka Radojević, Institut IMS, Beograd
6. Dr Nenad Šušić, Institut IMS, Beograd
7. Dr Ksenija Janković, Institut IMS, Beograd
8. Dr Milorad Smiljanić, Institut za puteve, Beograd
9. Professor Mihailo Trifunac, Civil Eng. Department University of Southern California, Los Angeles, USA
10. Prof.dr Dubravka Bjegović, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakulte, Zagreb, Hrvatska
11. Predrag Popović, Wiss, Janney, Elstner Associates, Northbrook, Illinois, USA
12. Professor Asterios Lionis, Democratus University of Trace, Faculty of Civil Eng., Greece
13. Professor Ivan Damnjanović, Texas A&M University, College Station, TX Zachry Department of Civil Engineering, USA
14. Prof. dr Meri Cvetkovska, Građevinski fakultet, Univ. „Sv. Kiril i Metodij“, Skoplje, Makedonija
15. Prof. dr Miloš Knežević, Građevinski fakultet, Podgorica, Crna Gora
16. Prof. dr Damir Zenunović, Univerzitet u Tuzli, BIH

## **ORGANIZACIONI ODBOR**

1. Prof. dr Dragica Jevtić, Građevinski fakultet, Beograd
2. Dr Vencislav Grabulov, Institut IMS, Beograd
3. Prof. dr Branko Božić, Građevinski fakultet, Beograd
4. Prof. dr Mihailo Muravljev, Građevinski fakultet, Beograd
5. Prof. dr Boško Stevanović, Građevinski fakultet, Beograd
6. Prof. dr Zoran Grdić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
7. Prof. dr Dragoslav Šumarac, Građevinski fakultet, Beograd
8. Prof. dr Vlastimir Radonjanin, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
9. Prof. dr Karolj Kasaš, Građevinski fakultet, Subotica
10. Prof. dr Milan Dimkić, Institut "Jaroslav Černi", Beograd
11. Milutin Ignjatović, generalni direktor Saobraćajnog Instituta CIP, Beograd
12. Pal Kermeci, inž.tehn. "Potisje Kanjiža", Kanjiža
13. Vesna Zvekić, dipl.inž.tehn., „Polet“ Novi Bečej



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

UDK: 691.328.5  
66.972.16

### SVOJSTVA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA SPRAVLJENOG SA DODATKOM OTPADNIH MATERIJALA KAO MINERALNOG DODATKA

**Rezime:** Veliki problem održavanja zdrave životne sredine predstavlja otpad nastao industrijskom proizvodnjom ili odlaganjem dotrajalih proizvoda koji su izgubili upotrebnu vrednost. Beton kao kompozitni materijal je pogodan za primenu otpadnih materijala kao jedna od komponenti u njegovom sastavu. Otpadni materijali se u betonu mogu koristiti kao delimična zamena cementa, delimična zamena agregata ili kao ojačanje betonskog kompozita. U ovom radu je prikazano istraživanje uticaja usitnjenog recikliranog stakla od katodnih cevi, flotacijske jalovine iz rudnika bakra, elektrofilterskog pepela, crvenog mulja i krečnjačkog filera kao mineralnog dodatka na svojstva svežeg i očvrstlog samougrađujućeg betona.

**Ključne reči:** samougrađujući beton, otpadni materijali, reciklirano staklo od katodnih cevi, flotacijska jalovina, elektrofilterski pepeo, crveni mulj, krečnjački filer

### PROPERTIES OF SELF COMPACTING CONCRETE MADE WITH ADDITION OF WASTE MATERIALS AS MINERAL ADMIXTURE

**Abstract:** Waste materials generated by industrial production and disposal of no longer working products are large problem when maintenance of healthy environment is concerned. Since concrete is a composite material, waste materials can suitably be used in its composition. Waste materials in concrete can be used as partial substitution of cement, partial substitution of aggregate or as reinforcement of concrete composite. In this paper, the research of effects of milled recycled glass from cathode tubes, flotation tailings from a copper mine, fly ash, red mud and limestone filler as mineral admixtures on properties of fresh and hardened self compacting concrete.

**Key words:** self compacting concrete, waste materials, recycled cathode ray tube glass, flotation tailings, fly ash, red mud, limestone filler

<sup>1</sup> Docent, dr, Univerzitet u Nišu, Građevinsko arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva br. 14, Niš, Srbija, e-mail: [nenad.ristic@gaf.ni.ac.rs](mailto:nenad.ristic@gaf.ni.ac.rs)

<sup>2</sup> Profesor, dr, Univerzitet u Nišu, Građevinsko arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva br. 14, Niš, Srbija, e-mail: [zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs](mailto:zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs)

<sup>3</sup> Vanredni profesor, dr, Univerzitet u Nišu, Građevinsko arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva br. 14, Niš, Srbija, e-mail: [gordana.toplicic.curcic@gaf.ni.ac.rs](mailto:gordana.toplicic.curcic@gaf.ni.ac.rs)

<sup>4</sup> Asistent, master, Univerzitet u Nišu, Građevinsko arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva br. 14, Niš, Srbija, e-mail: [dusan.grdic@gaf.ni.ac.rs](mailto:dusan.grdic@gaf.ni.ac.rs)

<sup>5</sup> Dr, Visoka građevinsko-geodetska škola, Hajduk Stankova br. 2, Beograd, e-mail: [ivickad@gmail.com](mailto:ivickad@gmail.com)

## 1. UVOD

Osnovni postulat održive gradnja jeste upotreba građevinskih materijala koji neće negativno uticati na životnu sredinu, kao i pravilno upravljanje otpadom nastalim prilikom građenja ili rušenja objekata. U poslednjih nekoliko decenija se sve više pažnje obraća na ekološke probleme koji prate brz tehnološki i industrijski razvoj, a jedan od najvažnijih problema je svakako deponovanje i reciklaža otpadnih materijala i nusprodukata industrijske proizvodnje. Sa druge strane, beton kao kompozitni i vrlo često korišćeni građevinski materijal je pogodan za primenu otpadnih materijala kao jedna od komponenti u njegovom sastavu. Otpadni materijali se u betonu mogu koristiti kao delimična zamena cementa, delimična zamena agregata ili kao ojačanje betonskog kompozita. Upravo integrisanje ovih materijala u sam beton može u znatnoj meri doprineti rešavanju problema njihovog odlaganja. Međutim, za postizanje ovog cilja je važno utvrditi kako ovi materijali utiču na svojstva betona i u kojoj meri se oni mogu dodavati, a da se pritom ne ugrozi njegova nosivost i postojanost koja ga čini tako zahvalnim građevinskim materijalom.

U ovom radu je prikazano istraživanje uticaja usitnjenog recikliranog stakla od katodnih cevi, flotacijske jalovine iz rudnika bakra, elektrofilterskog pepela, crvenog mulja iz rudnika aluminijuma i krečnjačkog filera kao mineralnog dodatka na svojstva svežeg i očvrstlog samougrađujućeg betona. Sastav samougrađujućeg betona moguće je projektovati na više načina, ali se pritom mora voditi računa da se postignu odgovarajuća reološka svojstva svežeg betona, kao što su fluidnost, viskoznost, otpornost na segregaciju [1]. Svaki od pomenutih materijala ima karakterističan uticaj na beton, te je pre spravljanja betona potrebno svaki zasebno proučiti.

Elektrofilterski pepeo se veoma često koristi kao dodatak pri spravljanju samougrađujućeg betona. Istraživanjima je utvrđeno da se njegovim dodavanjem smanjuje vreme rasprostiranja  $T_{500}$  [2], poroznost [3] kao i skupljanje i tečenje [4]. Sferični oblik čestica pepela povećava pokretljivost i obradljivost betona. Prisustvo letećeg pepela usporava reakciju alita, pa su rane čvrstoće betona niže u odnosu na uobičajene vrednosti za SCC bez mineralnih dodataka. Međutim, vremenom se prirast čvrstoća povećava i na 90 dana se izjednačava sa odgovarajućim etalon-betonom. Zbog smanjene poroznosti, betoni sa dodatkom elektrofilterskog pepela postižu, opšte uzev, veće konačne čvrstoće [5], ali ovaj uticaj u mnogome zavisi od količine dodatog pepela. Prevelika količina elektrofilterskog pepela u betonu može dovesti do smanjenja njegove čvrstoće [6-8].

U procesu proizvodnje bakra nastaju velike količine otpadnog materijala koje se deponuju i njihovo skladištenje predstavlja veliki ekološki problem. Flotacijska jalovina, kao jedan od nusprodukta proizvodnje bakra, je bogata oksidima gvožđa i silikatima pa je samim tim pogodna za proizvodnju betona i maltera. Prema njenom hemijskom sastavu, može se koristiti ili kao dodatak običnom portland cementu ili kao zamena sitnijih čestica agregata. Na ovaj način moguće je rešavanje velikog metalurškog ekološkog problema uz veliku ekonomsku korist, a ujedno vrši se i smanjenje emisije gasova i energije potrebne za proizvodnju iste količine materijala uz očuvanje prirodnih resursa [9]. Onuaguluchi i Eren su u svojim istraživanjima pokazali da betoni sa dodatkom flotacijske jalovine, poseduju poboljšane mehaničke karakteristike u odnosu na vibrirani beton. SCC betoni sa mineralnim dodatkom flotacijske jalovine imaju povećanu čvrstoću na pritisak, zatezanje smicanjem i savijanjem. Takođe je uočena povećana otpornost na abraziju i manja dubina penetracije hlorida. Ovakve poboljšane karakteristike su izraženije kod korišćenja 5%

flotacijske jalovine i većeg vodocementnog faktora (povećava se apsorpcija vode upotrebom flotacijske jalovine) [10]. Oni su takođe ispitivali i hemijska dejstva na betone sa flotacijskom jalovinom, pa su na osnovu tih ispitivanja odredili da se sa povećanjem prisustva flotacijske jalovine u betonu povećava otpornost na dejstva kiselina, ali se istovremeno smanjuje otpornost na razornu ekspanziju sulfata [11].

U Bajerovom procesu proizvodnje glinice, crveni mulj nastaje kao jalovina i sastoji se uglavnom od hematita, getita, kvarca, bemita, kalcita, trikalcijumaluminata, cinkovog i magnezijumovog oksida, natrijum hidroksida itd. Ono što čini mulj opasnim zagađivačem zemljišta, podzemnih i površinskih voda je alkalna tečna faza koja kao deponijski filter dospeva u podzemne vode noseći sa sobom i dalje visok sadržaj sode [12-13]. Veliki broj studija rađenih u svetu se odnose na primenu crvenog mulja u sastavu maltera i betona sa različitim aspektata: kao delimične zamene cementa, delimične zamene sitnog agregata u malterima, kao sastavni deo geopolimera i drugo. Na osnovu ispitivanja sprovedenim na samougrađujućim betonima utvrđeno je da dodatak crvenog mulja povećava viskozitet, dok smanjuje fluidnost i znatno smanjuje segregaciju i krvarenje betona, odnosno izdvajanje vode. Sa druge strane, poroznost samougrađujućeg betona se povećava, ali se skupljanje smanjuje [14]. Zapreminska masa očvrstlog betona se takođe smanjuje sa dodatkom crvenog mulja. Čvrstoća pri pritisku daje veće vrednosti u odnosu na etalon samougrađujući beton nakon 90 dana. Čvrstoća pri savijanju i čvrstoća pri zatezanju cepanjem je znatno veća u odnosu na etalon samougrađujući beton spravljenog bez crvenog mulja [14-15].

Krečnjački filer u samougrađujućem betonu doprinosi poboljšanju fluidnosti i viskoziteta, kao i smanjenju poroznosti betona [16-17]. Fluidnost samougrađujućeg betona sa mlevenim krečnjakom se povećava sa finoćom mliva ovog dodatka. U poređenju sa samougrađujućim betonom sa elektrofilterskim pepelom, beton sa mlevenim krečnjakom ima veću vodopropustljivost i nižu otpornost na mraz [18]. Krečnjak doprinosi stvaranju krupnih pora u betonu koje se formiraju oko većih čestica i deluje kao inhibitor hidratacije u ranoj fazi očvršćavanja [17].

Rađena su brojna istraživanja primene recikliranog stakla za spravljanje samougrađujućeg betona kao delimične zamene sitnog agregata [19-20]. Rezultati ispitivanja su pokazali da se sa povećanjem sadržaja recikliranog stakla u betonu povećava fluidnost i sadržaj vazduha, ali se mehaničke čvrstoće i statički modul elastičnosti smanjuju. Povećanje čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvuka sa povećanjem sadržaja recikliranog katodnog stakla je konstatovano prilikom ispitivanja samougrađujućeg betona sa krečnjačkim filerom [21].

## **2. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE**

### **2.1. Korišćeni materijali**

Za spravljanje betonskih mešavina korišćen je cement proizvođača „CRH“ CEM I 42,5 R, koji ispunjava sve uslove kvaliteta propisane standardom SRPS EN 197-1 [22]. Korišćene su tri frakcije rečnog agregata (0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm) poreklom iz reke „Južna Morava“ sa separacije „Šilo-prom“ d.o.o. Belotinac koji ispunjava sve uslove kvaliteta propisane standardom SRPS EN 206-1 [23] i EN 12620 [24]. Krečnjački filer je dobijen mlevenjem kamena iz kamenoloma „Babin Kal“ kod Bele Palanke, elektrofilterski pepeo je poreklom iz termoelektrane Kostolac B, flotacijska jalovina je iz

Rudarsko-topioničarskog basena Bor, crveni mulj je iz Kombinata aluminijuma u Podgorici nastao u Bayerovom procesu dobijanja aluminijuma. Reciklirano katodno staklo je preuzeto iz preduzeća „E-reciklaža“ Niš i usitnjeno laboratorijskim mlinom. Od hemijskih dodataka u mešavinama korišćen je superplastifikatori Sika Viscocrete 5380.

## 2.2. Sastav betonskih mešavina

Za potrebe eksperimentalnog istraživanja napravljeno je ukupno pet različitih mešavina samougrađujućeg betona i to: mešavina sa dodatkom krečnjačkog filera kao mineralnog dodatka (mešavina sa oznakom KF), mešavina sa dodatkom usitnjenog recikliranog stakla od katodnih cevi (RS), mešavina sa dodatkom elektrofilterskog pepela (EP), mešavina sa dodatkom flotacijske jalovine (FJ) i mešavina sa dodatkom crvenog mulja (CM). Betonske mešavine se razlikuju samo po vrsti primenjenog mineralnog praškastog dodatka. Svi ovi dodaci su finiji od 0,125 mm, jer su prosejani na odgovarajućem situ. Procentualni udeo zapremine komponenti u 1 m<sup>3</sup> betona je isti kod svih betonskih mešavina. Sve betonske mešavine su spravljene tako da imaju približno isto rasprostranje (oko 650 mm) prilikom ispitivanja fluidnosti betona. Ovaj uslov je ispunjen variranjem količine superplastifikatora. Sastavi betonskih mešavina za 1 m<sup>3</sup> betona dati su u tabeli 1.

Vrsta materijala		Procenat zapremine u 1m <sup>3</sup> [%]	Zapremina u 1m <sup>3</sup> [m <sup>3</sup> ]	Specifična masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Masa u 1m <sup>3</sup> [kg]	
Cement		12,7	0,127	3150	400	
Voda		18,15	0,1815	1000	181,5	
Sitan agregat	0/4 mm	29,62	0,2962	2620	776	
Krupan agregat	4/8 mm	31,69	11,58	0,1158	2650	307
	8/16 mm		20,11	0,2011	2650	533
Pretpost. sadržaj vazduha		2,0	0,02	–	–	
Oznaka mešavine	KF	Krečnjački filer	5,5	0,055	2720	150
		Superplastifikator	0,45	0,0045	1100	4,95
	RS	Reciklirano staklo	5,5	0,055	2840	156
		Superplastifikator	0,40	0,0040	1100	4,40
	EP	Elektrofilter. pepeo	5,5	0,055	2130	117
		Superplastifikator	0,50	0,0050	1100	5,50
	FJ	Flotacijska jalovina	5,5	0,055	3150	173
		Superplastifikator	0,43	0,0043	1100	4,68
	CM	Crveni mulj	5,5	0,055	2710	149
		Superplastifikator	0,80	0,008	1100	8,80

Tabela 1. Sastav betonskih mešavina korišćenih u eksperimentu za 1m<sup>3</sup>

### 2.3. Vrste ispitivanja sprovedenih na svežem i očvrslom betonu

Na svežem betonu sprovedena su sledeća ispitivanja: zapreminska masa prema standardu SRPS EN 12350-6:2010 [25], sadržaj vazduha u betonu prema SRPS EN 12350-7:2010 [26], Ispitivanje rasprostiranja sleganjem i ispitivanje rasprostiranja  $T_{500}$  prema standardu SRPS EN 12350-8:2012 [27], ispitivanje sposobnosti zaobilazanja prepreka pomoću L – kutije prema standardu SRPS EN 12350-10:2012 [28] i ispitivanje segregacije pomoću sita prema standardu SRPS EN 12350-11:2012 [29].

Na očvrslom betonu od fizičkih karakteristika ispitana je zapremiska masa betona u vodozasićenom stanju prema standardu SRPS EN 12390-7:2010 [30] na kockama ivice 15cm pri starosti betona od 2, 7 i 28 dana. Takođe, merena je i brzina prolaska ultrazvučnog impulsa prema standardu SRPS EN 12504-4:2008 [31] na kockama ivice 15cm pri starosti od 28 dana.

Ispitivana su i mehanička svojstva betona od kojih je najznačajnija čvrstoća pri pritisku. Ova karakteristika je ispitana u skladu sa standardom SRPS EN 12390-3:2010 [32] na epruvetama oblika kocke ivice 15cm pri starosti od 2, 7 i 28 dana. Vršeno je ispitivanje čvrstoće pri savijanju na epruvetama oblika prizme dimenzija  $10 \times 10 \times 40$  cm pri starosti od 28 dana prema standardu SRPS EN 12390-5:2010 [33]. Takođe je urađeno ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem (Brazilski opit) na cilindričnim uzorcima prečnika  $\varnothing 15$  cm i dužine 30 cm pri starosti od 28 dana prema standardu SRPS EN 12390-6:2012 [34]. Određena je veličina odskoka sklerometrom prema standardu SRPS EN 12504-2:2008 [35] na kockama ivice 15 cm pri starosti od 28 dana. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju čupanjem „Pull-off“ metodom urađeno je na kockama ivice 15 cm pri starosti od 28 dana prema standardu SRPS EN 1542:2010 [36].

Osnovni cilj ovog istraživanja jeste ispitivanje mogućnosti primene otpadnih materijala kao mineralnog dodatka za spravljanje samougrađujućeg betona. Stoga se betonska mešavina sa krečnjačkim filerom (KF) može smatrati etalonom sa kojim se upoređuju mešavine sa dodatkom sprasenog recikliranog stakla od katodnih cevi, elektrofilterskog pepela, flotacijske jalovine i crvenog mulja.

### 3. REZULTATI ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja karakteristika betona u svežem i očvrslom stanju dati su u tabelama 2 i 3. U tabelama su date srednje vrednosti dobijenih rezultata ispitivanja.

Karakteristika	Jedinica mere	Rezultat ispitivanja				
		KF	ST	EP	FJ	CM
Zapreminska masa	kg/m <sup>3</sup>	2375	2390	2340	2385	2365
Sadržaj vazduha	%	2,0	0,8	2,9	2,8	2,6
Rasprostiranje $T_{500}$	s	3,5	4,5	7,0	6,0	6,5
Ispitivanje rasprostiranja sleganjem	mm	650	660	640	660	640
Ispitivanje pomoću L – kutije $H_2/H_1$	(mm/mm)	0,94	0,95	0,91	0,92	0,87
Ispitivanje segregacije pomoću sita	%	14,0	12,8	5,6	6,8	6,0

Tabela 2. Rezultati ispitivanja karakteristika betona u svežem stanju



Karakteristika		Jedinica mere	Rezultat ispitivanja				
			KF	ST	EP	FJ	CM
Zapreminska masa u vodozasićenom stanju	2 dana	kg/m <sup>3</sup>	2375	2390	2340	2385	2365
	7 dana		2372	2388	2338	2382	2363
	28 dana		2370	2385	2336	2380	2359
Čvrstoća pri pritisku	2 dana	MPa	39,6	38,7	44,6	36,6	41,2
	7 dana		49,1	47,7	51,0	46,2	45,0
	28 dana		56,3	59,0	59,6	59,7	54,0
Čvrstoća pri savijanju		MPa	6,3	6,4	5,6	5,3	7,3
Čvrstoća pri zatezanju cepanjem		MPa	4,4	4,2	4,8	4,0	4,0
Čvrstoća pri zatezanju čupanjem - Pull-off		MPa	3,4	4,2	4,4	4,0	3,8
Brzina ultrazvučnog impulsa		m/s	4529	4691	4726	4608	4560
Odskok sklerometra		–	49,3	51,3	53,0	48,0	47,6

Tabela 3. Rezultati ispitivanja karakteristika betona u očvrslom stanju

#### 4. DISKUSIJA REZULTATA ISPITIVANJA I ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata ispitivanja zapreminske mase svežeg betona, tabela 2, može se zaključiti da ona pre svega zavisi od specifične mase korišćenog mineralnog dodatka, ali i od sadržaja vazduha u betonu što je primetno u slučaju betonske mešavine sa recikliranim staklom od katodnih cevi (mešavina sa oznakom RS). Najveću zapreminsku masu upravo ima mešavina sa oznakom RS koja je za 15 kg/m<sup>3</sup> veća u odnosu na etalon beton sa krečnjačkim filerom, a najmanju betonska mešavina sa elektrofilterskim pepelom EP koja je za 35 kg/m<sup>3</sup> manja u odnosu na etalon.

U pogledu sadržaja vazduha u svežem betonu mešavina sa oznakom RS imala je najmanju vrednost, odnosno 0,8%, a najveću vrednost mešavina sa oznakom EP (2,9%). Skoro sve betonske mešavine sa izuzetkom RS imaju približno isti sadržaj vazduha i bliske su vrednosti kao etalon KF, tabela 2.

Kao što je već napomenuto, sve betonske mešavine su spravljene tako da imaju približno isto rasprostranje (oko 650 mm) prilikom ispitivanja fluidnosti betona, tabela 2, što je postignuto primenom superplastifikatora. Ispitivanje T<sub>500</sub> pokazuje viskoznost betonske mešavine i predstavlja vreme za koje beton dostigne 500 mm rasprostiranja prilikom ispitivanja fluidnosti. Na osnovu rezultata ispitivanja iz tabele 2, može se zaključiti da sve betonske mešavine sa dodatkom otpadnih materijala imaju veće vrednosti T<sub>500</sub> u odnosu na etalon beton. Najveće vreme za rasprostiranje od 500 mm bilo je potrebno mešavini EP, slične vrednosti imale su mešavine CM i FJ, dok je mešavina RS imala blisku vrednost kao etalon beton KF.

Sposobnost zaobilažanja prepreka određena je pomoću L – kutije, a mogu se primeniti i druge metode: U – kutija, J – prsten i Kajimaina kutija. Na osnovu rezultata ispitivanja iz tabele 2, može se zaključiti da mešavina RS ima najbolju sposobnost

zaobilažanje prepreka, dok mešavina CM ima najmanju sposobnost u odnosu na ostale mešavine. Mešavine EP i FJ su imale međusobno bliske vrednosti, ali manje od etalona, odnosno mešavine KF.

Otpornost segregaciji izražava se kao procent količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu. Na osnovu rezultata ispitivanja iz tabele 2, može se zaključiti da sve mešavine sa otpadnim materijalima imaju veću otpornost u odnosu na etalon beton KF, pri čemu je najbolju otpornost pokazala mešavina EP, a zatim mešavine CM, FJ i ST, respektivno.

Što se tiče svojstava očvrslog betona, zapreminske mase betona u vodozasićenom stanju pri starosti od 2, 7 i 28 dana prate zapreminsku masu svežeg betona, tabela 3. Kao i u slučaju svežeg betona, razlike se javljaju usled različitih specifičnih masa mineralnih praškastih dodataka i sadržaja vazduha u betonu.

Čvrstoće pri pritisku betona, kao jedna od najbitnijih karakteristika betona, su međusobno slične pri odgovarajućoj starosti betona, tabela 3. Pri starosti betona od 2 dana najveću čvrstoću pokazala je mešavina EP koja je za 12,6% veća od etalona KF, a najmanju mešavina FJ koja je za 7,6% manja od KF. Pri starosti betona od 7 dana najveću čvrstoću takođe pokazala je mešavina EP koja je za 3,9% veća od etalona KF, a najmanju mešavina CM koja je za 8,4% manja od KF. Pri starosti od 28 dana najveći priraštaj čvrstoće pri pritisku imala je mešavina FJ. Ona je ujednom imala i najveću vrednost čvrstoće pri pritisku koja je za 6,0% veća u odnosu na KF, dok je najmanju vrednost pokazala mešavina CM koja je za 4,1% manja od KF.

Najveću vrednost čvrstoće pri savijanju pokazala je mešavina sa dodatkom crvenog mulja CM, koja je za 15,9% veća od etalona KF, a najmanju mešavina sa dodatkom flotacijske jalovine FJ koja je za 15,9% manja od EF. Mešavina sa dodatkom recikliranog stakla od katodnih cevi je imala blisku vrednost čvrstoće pri savijanju kao i mešavina KF, dok je mešavina sa dodatkom elektrofilterskog pepela imala za 11,1% manju vrednost od etalona KF.

U pogledu čvrstoće pri zatezanju cepanjem, sve betonske mešavine su imale slične vrednosti čvrstoća. Sve betonske mešavine izrađene sa otpadnim materijalima izuzev mešavine sa elektrofilterskim pepelom EP imale su manje vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem od etalona KF. Najveću vrednost imala je mešavina EP koja je za 9,1% veća od KF, a najmanju mešavine FJ i CM koja je za 9,1% manja od KF.

I u slučaju čvrstoće pri zatezanju čupanjem metodom Pull-off, sve betonske mešavine su imale slične vrednosti čvrstoća. Sve betonske mešavine izrađene sa otpadnim materijalima imale su veće vrednosti čvrstoće pri zatezanju čupanjem metodom Pull-off u poređenju sa etalom KF. Najveću vrednost imala je mešavina EP koja je za 29,4% veća od etalona KF, a najmanju od mešavina sa otpadnim materijalom imala je CM koja je za 11,8% veća od KF.

Brzina ultrazvučnog impulsa kroz beton u najvećoj meri zavisi od zapreminske mase očvrslog betona, poroznosti, ali i stepena hidratacije cementa, odnosno vezivnih materijala. Sve betonske mešavine izrađene sa otpadnim materijalima imale su veću brzinu prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton u poređenju sa etalom KF. Najveću vrednost imala je mešavina sa dodatkom elektrofilterskog pepela EP koja je za 4,3% veća od etalona KF, a najmanju od mešavina sa otpadnim materijalom imala je CM koja je za 0,7% veća od KF. Mešavina sa dodatkom recikliranog stakla od katodnih cevi je imala blisku vrednost brzine ultrazvučnog impulsa kroz beton kao i mešavina sa dodatkom elektrofilterskog pepela, dok je mešavina sa dodatkom flotacijske jalovine imala za 1,7% veću vrednost od KF.

Metoda određivanja odskočnog broja upotrebom sklerometra se zasniva na merenju površinske tvrdoće betona na osnovu koje se na vrlo jednostavan način može odrediti orijentaciona vrednost čvrstoće pri pritisku. Veličina odskoka sklerometra zavisi i od rasporeda i udaljenosti krupnih zrna agregata od površine betona. Na osnovu rezultata ispitivanja iz tabele 3, najveću vrednost odskoka sklerometra pokazala je mešavina EP koja je za 7,6% veća od etalona KF, dok je najmanju vrednost imala mešavina CM koja je za 3,4% manja od KF. Mešavina RS imala je za 4,1% veću vrednost odskoka sklerometra u odnosu na KF, a mešavina FJ za 2,6% manju od KF.

Na osnovu rezultata ispitivanja samougrađujućih betona sa dodatkom otpadnih materijala može se zaključiti da dodatak ovih materijala bitno ne utiče na smanjenje kvaliteta performansi betona u svežem i očvrsлом staju. Može se reći da čak i doprinose poboljšanju pojedinih svojstava betona koji su prikazani u ovom radu. Otpadni materijali poput elektrofilterskog pepela, recikliranog stakla i flotacijske jalovine pokazuju pucolansku aktivnost, te se može očekivati da performanse betona sa ovim dodacima u kasnijem periodu starosti budu još bolje. Posebnu pažnju treba obratiti na trajnost betonskih mešavina sa dodatkom otpadnih materijala poput recikliranog stakla od katodnih cevi, elektrofilterskog pepela, flotacijske jalovine i crvenog mulja. Dalja istraživanja treba usmeriti na tu stranu, budući da se dokazivanjem neugrožavanja trajnosti zaokružuje celina o mogućnosti primene ovih materijala u izradi betona.

## 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.

## 5. REFERENCE

- [1] Nina Štirmer N., Banjad Pečur I.: Mix design for self compacting concrete, *Gradjevinar* 4 (2009) 321-329
- [2] Ahari R.S., Erdem T.K., Ramyar K.: Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials* 75 (2015) 89–98
- [3] Mnahoncakova E., Pavlikova M, Grzeszczyk S., Rovnanikova P., Cerny R.: Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 1594–1600
- [4] Despotović I.: Uticaj različitih mineralnih dodataka na osobine samougrađujućih betona, Doktorska diertacija, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu (2014)
- [5] Hannesson G., Kuder K., Shogren R., Lehman D.: The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials* 30 (2012) 161–168
- [6] Siddique R.: Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash, *Materials and Design* 32 (2011) 1501–1507
- [7] Khatib J.M.: Performance of self-compacting concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 1963–1971

- [8] Sukumar B., Nagamani K., Srinivasa Raghavan R.: Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume of fly ash, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 1394–1401
- [9] Shi C., Mayer C., Behnood A.: Utilization of copper slag in cement and concrete, *Resources, Conservation and Recycling* 52 (2008) 1115–1120
- [10] Onuaguluchi O., Eren O.: Copper tailings as a potential additive in concrete: Consistency, strength, and toxic metal immobilizer, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* 19 (2012) 79-86
- [11] Onuaguluchi O., Eren O.: Cement mixtures containing copper tailings as an additive: durability properties, *Materials Research* 15 (2012) 1029-1036
- [12] Zlatičanin B., Vukčević M., Krgović M., Bošković I., Ivanović M., Zejak R.: Karakteristike geopolimera na bazi crvenog mulja kao komponente sirovinske mješavine, *Zaštita Materijala* 53 (2012) broj 4, p.p. 292-298, UDC:669.712.1.068-03.6.8.
- [13] Kadović M.V., Klačnja M. T., Blagojević N.Z., Rajko Vasiljević R, Jaćimović Ž.K., *Tretman tečne faze sa deponije crvenog mulja u kombinatu alumunijuma Podgorica, Hemijska industrija*, 58(4) 2004, p.p. 186-190
- [14] Liu R.X., Poon C.S.: Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete, *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) p.p. 384-391.
- [15] Shetty K.K., Nayak G., Vijayan V.: Effect of red mud and iron ore tailing on the strength of self compacting concrete, *European Scientific Journal* July 2014 edition vol.10, No.21 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.
- [16] Gomez-Soberon J.: Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study, *Cement and Concrete Research* 32 (2002), pp. 1301-1311
- [17] Persson B.: Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research* 33 (2002), pp. 373-379
- [18] Levy S.M., Helene P.: Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, *Cement and Concrete Research* 34 (2003), pp. 1975-1980
- [19] Ali E.E., Al-Tersawy S.H.: Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete, *Construction and Building Materials* 35 (2012) 785–791
- [20] Kou S.C., Poon C.S.: Properties of self-compacting concrete with recycled glass aggregate, *Construction and Building Materials* 31 (2009) 107–113
- [21] Sua-Iam G., Makul N.: Use of limestone powder to improve the properties of self compacting concrete produced using cathode ray tube waste as fine aggregate, *Applied Mechanics and Materials Vols. 193-194* (2012), pp. 472-476
- [22] SRPS EN 197-1:2013 Cement – Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente, Institut za standardizaciju Srbije, 2013
- [23] SPPS EN 206-1:2011 Beton – Deo 1: Specifikacije, performance i usaglašenost, Institut za standardizaciju Srbije, 2011
- [24] SRPS EN 12620:2010 Agregati za beton, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [25] SRPS EN 12350-6:2010 Ispitivanje svežeg betona - Deo 6: Zapreminska masa, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [26] SRPS EN 12350-7:2010 Ispitivanje svežeg betona - Deo 7: Sadržaj vazduha - Metode pritiska, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [27] SRPS EN 12350-8:2012 Ispitivanje svežeg betona – Deo 8: Samougrađujući beton – Ispitivanje raspodjele sleganjem, Institut za standardizaciju Srbije, 2012
- [28] SRPS EN 12350-10:2012 Ispitivanje svežeg betona – Deo 10: Samougrađujući beton - Ispitivanje pomoću L-kutije, Institut za standardizaciju Srbije, 2012
- [29] SRPS EN 12350-11:2012 Ispitivanje svežeg betona – Deo 11: Samougrađujući beton – Ispitivanje segregacije pomoću sita, Institut za standardizaciju Srbije, 2012
- [30] SRPS EN 12390-7:2010 Ispitivanje očvrslag betona – Deo 7: Zapreminska masa očvrslag betona, Institut za standardizaciju Srbije, 2010

- [31] SRPS EN 12504-4:2008 Ispitivanje betonskih konstrukcija – Deo 4: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa, Institut za standardizaciju Srbije, 2008
- [32] SRPS EN 12390-3:2010 Ispitivanje očvrsllog betona – Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [33] SRPS EN 12390-5:2010 Ispitivanje očvrsllog betona – Deo 5: Čvrstoća pri savijanju uzoraka za ispitivanje, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [34] SRPS EN 12390-6:2012 Ispitivanje očvrsllog betona – Deo 6: Čvrstoća pri cepanju zatezanjem uzoraka za ispitivanje, Institut za standardizaciju Srbije, 2012
- [35] SRPS EN 12504-2:2008 Ispitivanje betonskih konstrukcija – Deo 2: Ispitivanje bez razaranja — Određivanje veličine odskoka, Institut za standardizaciju Srbije, 2008
- [36] SRPS EN 1542:2010 Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Merenje prionljivosti "pull-off" metodom, Institut za standardizaciju Srbije, 2010