

Primljen / Received: 17.11.2015.

Ispravljen / Corrected: 13.9.2016.

Prihvaćen / Accepted: 10.7.2017.

Dostupno online / Available online: 10.2.2018.

Primjena industrijskih nusproizvoda kao mineralnih dodataka za samozbijajući beton

Autori:



¹Mr.sc. **Saša Marinković**, dipl.ing.građ.
marinkovic.s@mfkv.kg.ac.rs



²Mr.sc. **Milan Protić**, dipl.ing.građ.
protic.milan@gmail.com



³Mr.sc. **Stepa Paunović**, dipl.ing.građ.
stepa.paunovic@gmail.com



³Mr.sc. **Ivan Nešović**, dipl.ing.građ.
ivan.m.nesovic@gmail.com



³Mr.sc. **Jelena Bijeljić**, dipl.ing.građ.
jelena.bijeljic@hotmail.com

¹Sveučilište u Kragujevcu, Fakultet strojarstva i građevine

²Visoka tehnička škola strukovnih studija u Nišu

³Sveučilište u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet

Stručni rad

Saša Marinković, Milan Protić, Stepa Paunović, Ivan Nešović, Jelena Bijeljić

Primjena industrijskih nusproizvoda kao mineralnih dodataka za samozbijajući beton

Upotreba otpadnih materijala kao mineralnih dodataka samozbijajućem betonu može pridonijeti rješavanju problema njihovog odlaganja, ali je potrebno utvrditi njihovu djelotvornost. Ispitan utjecaj elektrofiltarskog pepela, mljevenih otpadnih opekarskih elemenata – crjepova, flotacijske jalovine i silicijske prašine na konzistenciju betona i njihove tlačne čvrstoće, vlačnu čvrstoću pri savijanju i vlačnu čvrstoću pri cijepanju. Dobiveni rezultati ispitivanja mješavina samozbijajućeg betona su uspoređeni s mješavinom konvencionalnog betona.

Ključne riječi:

samozbijajući beton, mehaničke karakteristike betona, mineralni dodaci, industrijski nusproizvodi

Professional paper

Saša Marinković, Milan Protić, Stepa Paunović, Ivan Nešović, Jelena Bijeljić

Application of industrial by-products as mineral admixtures for self-compacting concrete

Although the use of waste materials as mineral admixtures for self-compacting concrete can contribute to solving the problem of their disposal, the effect of such use should be further explored. The influence of fly ash, powdered waste brick elements - roof tiles, flotation tailing and silica fume, on the consistency, compressive strength, bending tensile strength, and tensile splitting strength of concrete, is studied. Self-compacting concrete mixtures test results are compared to a common concrete mixture.

Key words:

self-compacting concrete, mechanical characteristics of concrete, mineral admixtures, industrial by-products

Fachbericht

Saša Marinković, Milan Protić, Stepa Paunović, Ivan Nešović, Jelena Bijeljić

Anwendung industrieller Nebenprodukte als mineralzusätze für selbstverdichtenden beton

Die Verwendung von Abfallmaterialien als Mineralzusätze für selbstverdichtenden Beton kann der Lösung des Problems ihrer Entsorgung beitragen, aber es ist notwendig, deren Wirksamkeit festzustellen. Untersucht wurde der Einfluss von Elektrofiltarasche, gemahlener Abfallziegelementen – Dachziegel, Flotationsabraum und Siliziumstaub auf die Konsistenz des Betons und deren Druckfestigkeit, auf die Zugfestigkeit beim Biegen und die Zugfestigkeit bei Spaltung. Die erhaltenen Ergebnisse der Untersuchungen der Mischungen selbstverdichtenden Betons wurden mit der Mischung konventionellen Betons verglichen.

Schlüsselwörter:

selbstverdichtender Beton, mechanische Betonmerkmale, Mineralzusätze, industrielle Nebenprodukte

1. Uvod

U posljednjih nekoliko desetljeća sve se više pozornosti usmjeruje na ekološke probleme koji prate brz tehnološki i industrijski razvoj, a jedan od najvažnijih problema je svakako odlaganje i reciklaža otpadnih materijala i nusproizvoda industrijske proizvodnje. S druge strane, budući da se beton kao građevni materijal vrlo često koristi, u betonskoj se mješavini može dio cementa ili kamenog agregata zamijeniti raznim drugim materijalima, pa čak i industrijskim nusproizvodima. Upravo integriranje tih materijala u sam beton može u znatnoj mjeri pridonijeti rješavanju problema njihova odlaganja. Međutim, za postizanje ovog cilja je važno utvrditi kako ti materijali utječu na karakteristike betona i u kojoj mjeri se oni mogu dodavati, a da pritom ne ugroze željene karakteristike koje beton čine tako zahvalnim građevnim materijalom. Cilj je ovog rada analizirati kako elektrofiltarski pepeo, mljeveni otpadni crjepovi, flotacijska jalovina nastala u procesu proizvodnje bakra i silicijske prašine, primijenjeni kao mineralni dodaci samozbijajućem betonu, utječu na tlačnu čvrstoću betona, vlačnu čvrstoću pri savijanju i pri cijepanju. Kako se u posljednje vrijeme sve više primjenjuje samozbijajući beton, konvencionalan (vibrirani) beton biva potisnut iz upotrebe, rad je usmjeren na ispitivanje utjecaja navedenih nusproizvoda na samozbijajući beton. Sastav samozbijajućeg betona moguće je projektirati na više načina, ali se pritom mora voditi računa da se postignu odgovarajuća reološka svojstva, kao što su granica tečenja i plastična viskoznost, tj. udio vode, količina uvučenog zraka, vrsta i udio sitnih čestica itd. [1]. Utjecaj spomenutih materijala na konzistenciju svježeg betonske mješavine prethodno je istražen. Svaki od spomenutih materijala ima karakterističan utjecaj na beton, pa je potrebno svaki posebno detaljnije proučiti.

Elektrofiltarski pepeo (EFP) se vrlo često upotrebljava kao dodatak u pripremi samozbijajućeg betona. Istraživanjima je utvrđeno da se njegovim dodavanjem smanjuje vrijeme rasprostiranja T500 [2], poroznost [3] kao i skupljanje i tečenje [4]. Sferični oblik čestica pepela povećava fluidnost i obradivost betona. Prisutnost EFPa usporava reakciju alita pa su rane čvrstoće betona niže u odnosu na uobičajene vrijednosti za samozbijajući beton bez mineralnih dodataka. Zbog smanjene poroznosti, betoni s dodatkom EFPa postižu, općenito, veće konačne čvrstoće [3], ali ovaj utjecaj mnogo ovisi o količini dodanog pepela. Prevelika količina EFPa u betonu može dovesti do smanjenja njegove čvrstoće [5-8].

Upotreba mljevenog otpadnog crijepa (MC) kao mineralnog dodatka sitnim česticama u pripremi samozbijajućeg betona omogućava reciklažu toga građevnog materijala i pridonosi daljnjem razvoju ekoloških betona. Bernardinus i ostali su pokazali da MC u količini od 20 % u udjelu svih sitnih čestica značajno poboljšava karakteristike svježeg i očvrstlog samozbijajućeg betona. Uz rasprostiranje od 65 cm, ovisno o projektiranoj recepturi oni su s ovom vrstom dodatka uspješno pripremili betone čvrstoće od 40 MPa do 60 MPa [9]. Rezultati

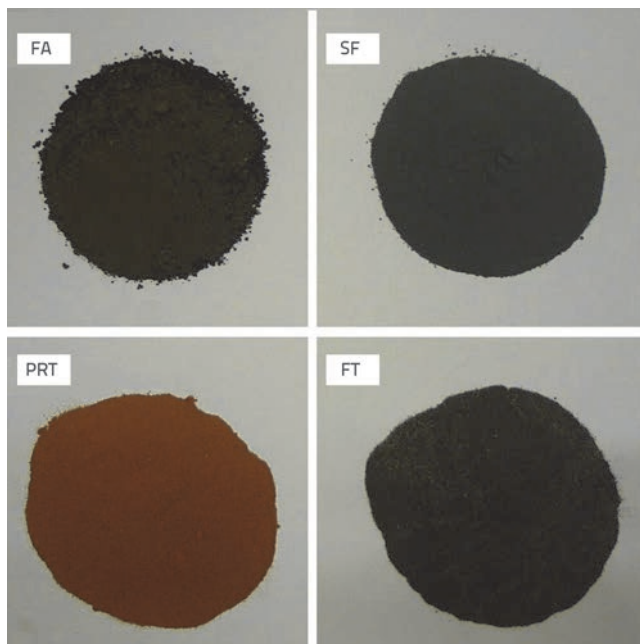
istraživanja pokazuju da MC kao dodatak može koristiti i u kombinaciji s ostalim otpadnim materijalima među kojima su i čestice otpadnog mramora. Zajedno ta dva materijala daju zadovoljavajuću konzistenciju samozbijajućeg betona [10]. Osim MC, otpadni materijal koji se samostalno može koristiti kao dodatak uz očekivanje istih rezultata je i mljevena opeka i mljeveni opekarski elementi. Optimalna je količina toga dodatka u rasponu 12,5 % - 37,5 %, [11]. Prednost je ove vrste otpadnih materijala udio silicijevog dioksida koji tim materijalima daje pucolanska svojstva [9].

U procesu proizvodnje bakra nastaju velike količine otpadnog materijala koji se deponira i njihovo skladištenje predstavlja veliki ekološki problem. Flotacijska jalovina (FJ), kao jedan od nusproizvoda u proizvodnji bakra bogata je oksidima željeza i silicija, što je pogodno za proizvodnju betona i mortova. Prema njenom kemijskom sastavu, može se koristiti ili kao dodatak običnom portlandskom cementu ili kao zamjena sitnijih čestica agregata. Na ovaj način moguće je rješavati veliki metalurški ekološki problem uz veliku ekonomsku korist, a ujedno se smanjuje i emisija plinova i energija potrebna za proizvodnju iste količine materijala uz očuvanje prirodnih resursa [12]. Onuaguluchi i Eren [13] su u svojim istraživanjima pokazali da beton s dodatkom FJ, posjeduje poboljšane mehaničke karakteristike u odnosu na referentni beton. Samozbijajući beton s mineralnim dodatkom FJ ima povećanu tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću na savijanje i posmičnu čvrstoću. Također je uočena povećana otpornost na habanje i manja dubina penetracije klorida. Ove poboljšane karakteristike su izraženije pri upotrebi 5 % FJ i pri većem vodocementnom faktoru (povećava se apsorpcija vode upotrebom FJ) [13]. Oni su također ispitivali i kemijsko djelovanje na betone s FJ, pa su na osnovi tih ispitivanja odredili da se s povećanjem udjela FJ u betonu povećava otpornost na djelovanje kiselina, ali se istovremeno smanjuje otpornost na razorno širenje sulfata [14].

Silicijska prašina (SP) je nusproizvod koji se dobiva u procesu proizvodnje silicijskih legura. Ona zagađuje životnu sredinu i štetno utječe na zdravlje. Dodavanje silicijske prašine betonu utječe na rješavanje problema odlaganja ovog otpadnog materijala, a pritom se dobiju betoni visokih čvrstoća. Zbog svoje pucolanske aktivnosti, ako se upotrebi u odgovarajućem postotku, SP može mnogo poboljšati svojstva betona u svježem i u očvrstlom stanju (koheziju, čvrstoće, nepropusnost i trajnost). H.A.F. Dehwah je u svojim ispitivanjima pokazao da beton, koji sadrži 8 % obične kamene prašine i 5 % SP, ima izuzetno veliku otpornost na koroziju armature [15]. SP nepovoljno utječe na obradivost i konzistenciju svježeg betonske mješavine. Međutim, prema ispitivanjima D.D.L. Chunga, dodavanjem SP betonu postižu se i poboljšanja brojnih karakteristika, kao što su: prigušenje vibracija, otpornost na temperaturne promjene, otpornost na habanje morta, smanjeno skupljanje pri sušenju betona, povećana vodonepropusnost, smanjena alkalno-silikatna reakcija, povećana otpornost na kemijska djelovanja i ojačana veza s cementom [16].

2. Eksperimentalno istraživanje

Eksperimentalno istraživanje je napravljeno na jednom tipu mješavine konvencionalnog betona oznake M-R i četiri tipa mješavine samozbijajućeg betona s različitim mineralnim dodacima: elektrofiltarskim pepelom (eng. *fly ash* - FA), mljevenim otpadnim crijepom (eng. *powdered waste clay rooftiles* - PRT), flotacijskom jalovinom (eng. *flotation tailing* - FT) i silicijskom prašinom (eng. *silica fume* - SF). Oznake mješavina samozbijajućeg betona su izvedene prema korištenim dodacima: M-FA, M-PRT, M-FT, M-SF.



Slika 1. Mineralni dodaci u mješavinama samozbijajućeg betona

Za spravljanje mješavina korišten je portlandski cement CEM I 52,5R proizvođača "Holcim", koji ispunjava sve uvjete kvalitete propisane normom SRPS EN 197-1 [17]. Korištene su tri frakcije riječnog agregata (0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm) porijeklom iz rijeke Južne Morave sa separacije "Vodogradnja" d.o.o. Pukovac koji ispunjava sve uvjete kvalitete propisane standardom EN 206: 203 [18] i EN 12620 [19]. Elektrofiltarski pepeo je podrijetlom

iz termoelektrane "Obrenovac B", otpadni mljeveni crijep je od proizvođača građevnog materijala "IGM Mladost d.o.o." iz Leskovca, flotacijska jalovina je iz "Rudarsko-topioničarskog kombinata Bor", a silicijska prašina "Sikafume" je od proizvođača "Sika". Kemijski sastavi upotrijebljenih materijala prikazani su u tablici 1. iz koje se vidi da najviše silicijeva dioksida (SiO_2) ima u silicijskoj prašini, a najmanje u flotacijskoj jalovini. Također, najveći postotak spojeva s pucolanskim svojstvima (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3) ima silicijska prašina. Prisutnost ostalih oksida je zanemariva. Izgled korištenih mineralnih dodataka prikazan je na slici 1. Od kemijskih dodataka u mješavinama korišteni su plastifikatori "Sika 3077 Viscocrete" za konvencionalni beton i "TKK srpenica Cementol Hiperplast 463" za mješavine samozbijajućeg betona.

Sastojci upotrijebljenih mješavina u eksperimentu, za kubni metar betona, prikazani su u tablici 2. Odnosi masa cementa, frakcija agregata i mineralnih dodataka održavani su konstantnim u svim tipovima mješavina, a mijenjala se samo količina vode (u rasponu od 169 do 214 kg/m^3) i plastifikatora (u rasponu od 2,82 do 5,64 kg/m^3) kako bi bio ispunjen zahtjev približno jednakih rasprostiranja svježih mješavina samozbijajućeg betona prema normi SRPS EN 12350-8 [20]. Mješavine samozbijajućeg betona spravljene su prema izmijenjenim preporukama i smjernicama Europske federacije nacionalnih udruženja proizvođača i izvođača specijaliziranih građevnih proizvoda za beton (eng. *European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete* - EFNARC), prema [21]. Specifikacije, preporuke i moguće tolerancije rezultata karakteristika svježih mješavina samozbijajućeg betona u skladu su s normom EN 206: 2013 [18]. Vodo/prašasti omjer (w/p) prikazan je u tablici 3 te izračunan na sljedeći način:

$$w_p = \frac{m_w + m_{sp}}{m_{pc} + m_{ma}} \quad (1)$$

gdje su:

w_p - vodo/prašasti omjer

m_w - masa vode u 1 m^3 betonske mješavine [kg]

m_{sp} - masa plastifikatora u 1 m^3 betonske mješavine [kg]

m_{pc} - masa portlandskog cementa u 1 m^3 betonske mješavine [kg]

m_{ma} - masa mineralnog dodatka u 1 m^3 betonske mješavine [kg]

Tablica 1. Kemijski sastav portland cementa (PC) i korištenih mineralnih dodataka u samozbijajućem betonu

Komponente [%]	PC	EFP	MC	FJ	SP
SiO_2	21,62	53,84	56,18	40,80	93,60
CaO	60,16	5,15	6,36	7,36	0,05
MgO	2,34	3,00	2,14	0,86	0,05
Al_2O_3	7,00	30,29	15,14	5,90	0,27
Fe_2O_3	2,60	3,60	5,57	41,72	0,21
K_2O	0,66	0,83	2,18	1,20	0,50
SO_3	2,55	1,86	-	-	0,80
Na_2O	0,33	0,51	1,08	0,35	0,23

Tablica 2. Sastav betonskih mješavina za 1 m³

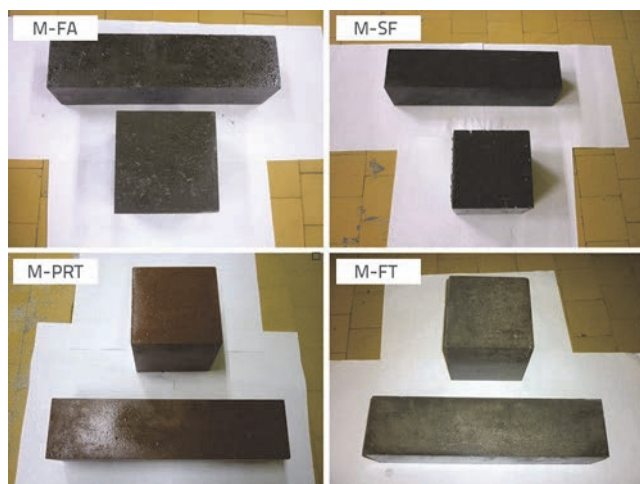
Oznaka mješavine	Agregat [kg]			PC [kg]	Mineralni dodaci [kg]				Plastifikator [kg]	Voda [kg]	w/p
	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm		EFP	MC	FJ	SP			
M-R	825	308	587	398	-	-	-	-	3,20	169,0	0,433
M-FA	762	286	540	395	118	-	-	-	5,64	183,7	0,369
M-PRT	770	288	547	403	-	121	-	-	2,82	210,0	0,406
M-FT	794	297	563	416	-	-	125	-	2,91	208,0	0,390
M-SF	742	278	526	389	-	-	-	116	5,44	214,0	0,434

Tablica 3. Karakteristike svježih betonskih mješavina

Oznaka mješavine	M-R	M-FA	M-PRT	M-FT	M-SF
Gustoća svježeg bet, $\gamma_{fr,con}$ [kg/m ³]	2290,00	2290,37	2341,23	2405,43	2270,12
Slijeganje (mm)	150	-	-	-	-
Rasprostiranje slijeganjem [mm]	-	650	680	655	630
T_{500} test [s]	-	6,0	5,5	6,0	7,0
L-box test H_2/H_1 [mm/mm]	-	0,92	0,95	0,91	0,87
Otpornost segregaciji prosijavanjem [%]	-	5,69	7,89	6,75	6,49
Temperatura [°C]	21,5	23,1	23,3	21,4	21,8

3. Rezultati ispitivanja

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za građevne materijale na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Nišu. Tijekom eksperimenta za svaku mješavinu napravljeno je po dvanaest probnih uzoraka dimenzija 15 x 15 x 15 cm radi ispitivanja tlačne čvrstoće i po tri probna uzorka dimenzija 10 x 10 x 40 cm za ispitivanje čvrstoće na savijanje i posmične čvrstoće, tako da je ukupno ispitano sedamdeset pet uzoraka.



Slika 2. Probni uzorci od različitih mješavina samozbijajućeg betona

Na slici 2. prikazan je izgled ispitnih uzoraka. Na mješavinama samozbijajućeg betona u svježem stanju mjerena su sljedeća svojstva: gustoća, rasprostiranje (eng. *Slump-flow test*, T_{500} test),

sposobnost zaobilazanja prepreka (eng. *L-box test*), otpornost segregaciji prosijavanjem (eng. *Sieve stability test*) i temperatura, a na mješavini konvencionalnog betona mjerena je: gustoća, slijeganje (eng. *Slump test*) i temperatura. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 3.



Slika 3. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća betona mjerena je na uzorcima starosti 2, 7, 28 i 90 dana i određena je prema standardima SRPS EN 12390-3:2010 [22]. Ispitivanje je provedeno na hidrauličkoj preši "HPM – 3000", proizvođača "ZRMK Ljubljana" (raspon mjerenja 0–3000 kN, točnost 2,5 kN), slika 3. Čvrstoća pri savijanju

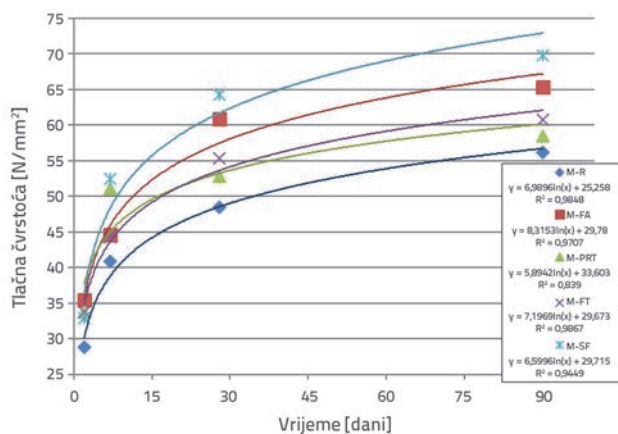
Tablica 4. Rezultati ispitivanja čvrstoća

Oznaka mješavine	Gustoća očvrstnalog betona $\gamma_{mat,con}$, [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [MPa]				Vlačna čvrstoća pri savijanju [MPa]	Vlačna čvrstoća pri cijepanju [MPa]
		2 dana	7 dana	28 dana	90 dana	28 dana	28 dana
M-R	2293,83	28,78	40,88	48,44	56,12	3,30	5,01
M-FA	2292,84	35,44	44,56	60,89	65,30	5,11	4,41
M-PRT	2338,27	33,78	51,11	52,78	58,46	6,34	4,33
M-FT	2407,46	33,78	44,22	55,34	60,71	6,47	3,65
M-SF	2267,88	32,89	52,44	64,20	69,85	5,01	3,31

određena je prema SRPS EN 12390-5:2010 [23] na uzorcima starosti od 28 dana. Ispitivanje je provedeno na hidrauličkoj preši "WPM VEB Thüringer Industrierwerk Rauenstein" (raspon mjerenja 0–20000 N, točnost 25 N), slika 4. Vlačna čvrstoća pri cijepanju ispitana je također na prizmatičnim uzorcima pri starosti betona od 28 dana prema SRPS EN 12390-6:2012 [24]. Ispitivanje je provedeno na hidrauličkoj preši "HPM – 3000", proizvođača "ZRMK Ljubljana" (raspon mjerenja 0–1000 kN, točnost 0,5 kN). Svi betonski uzorci s njegovani u vodenoj komori do dana ispitivanja prema SRPS EN 196-3 [25]. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 4.



Slika 4. Ispitivanje vlačne čvrstoće pri savijanju



Slika 5. Dijagram promjene tlačne čvrstoće ispitnih uzoraka tokom vremena (os x je vrijeme, os y je tlačna čvrstoća)

Promjena izmjerenih tlačnih čvrstoća tijekom vremena za uzorke svih tipova betonskih mješavina prikazana je dijagramom na slici 5. Koeficijenti korelacije su u granicama od $R^2 = 0,839$ (za mješavinu M-PRT) do $R^2 = 0,9867$ (za mješavinu M-FT), što upućuje na dobru aproksimaciju funkcije promjene tlačne čvrstoća tijekom vremena.

4. Analiza rezultata

Cilj je bio ovog istraživanja postići jednaku konzistenciju svih ispitnih mješavina samozbijajućeg betona i procijeniti utjecaj mineralnih dodataka u samozbijajućem betonu usporedbom tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće pri savijanju i cijepanju. Također, dobiveni rezultati ispitivanja čvrstoća mješavina samozbijajućeg betona uspoređeni su s mješavinom konvencionalnog betona kako bi šira javnost stekla uvid u prednosti korištenja otpadnih materijala kao mineralnih dodataka u proizvodnji samozbijajućem betonu.

4.1. Karakteristike mješavina samozbijajućeg betona u svježem stanju

Prilikom pripreme mješavina samozbijajućeg betona prioritet je bio postići jednaku konzistenciju, da se dobiju približno isti uvjeti ugradnje, kako bi se njihove karakteristike mogle međusobno uspoređivati. Stoga su u svim mješavinama maseni odnosi cementa, frakcija agregata i mineralnih dodataka održavani konstantnim, a modificirana je samo količina vode i plastifikatora.

Rasprostiranje ili sposobnost tečenja mješavina mjereno je pomoću Slump-flow i T500 testova. Slump-flow test je pokazao rasprostiranje mješavina u rasponu od 630 do 680 mm. M-SF mješavina pokazala je najnižu, dok je M-PRT pokazala najveću sposobnost tečenja. Samo se mješavina M-PRT svrstava u razred SF2 (660-750 mm), a sve ostale u razred SF1 (550-650 mm).

T500 test pokazuje vrijeme u kojem beton dostiže promjer rasprostiranja od 500 mm. T500 vrijeme je mjera brzine protoka a time i viskoznosti. Rezultati dobiveni ovim ispitivanjem bili su u rasponu od 5,5 do 7,0 sekundi, što potvrđuje da je najsporija (ili najmanje protočna) bila M-SF, a najviše protočna je bila M-PRT mješavina. Mješavina M-PRT

imala je vrijeme koje odstupa od preporučenih vrijednosti (3,5–6 s), ali je ipak pokazala dobru viskoznost. Nije bila uočena segregacija, niti razdvajanje vode. Vrijeme duže od 2 sekunde svrstava sve mješavine kao VS2.

L-box test je korišten za određivanje sposobnosti zaobilaženja prepreka mješavina samozbijajućeg betona. Sposobnost zaobilaska prepreka izračunava se kao odnos visine betona na prednjem rubu u horizontalnom dijelu i visine na rubu uz vertikalni dio. Ispitivanje je provedeno s 3 armaturne šipke, a dobiveni rezultati su bili između 0,87 i 0,95, što pokazuje dobru sposobnost prolaska prepreka za sve mješavine i svrstava ih u klasu PL2 (> 0,8). Najnižu prolaznu sposobnost imala je M-SF i najvišu M-PRT mješavina, što je u skladu s rezultatima rasprostiranja.

Otpornost na segregaciju svježeg samozbijajućeg betona je ispitana ispitivanjem otpornosti segregaciji prosijavanjem (eng. *Sieve stability test*). Najveći postotak cementne paste koja je prošla kroz sito ima M-PRT (7,89 %), a najniži M-FA (5,69 %). Rezultati pokazuju dobru otpornost na segregaciju za sve mješavine, a postotak prolaza niži je od 15 % te ih svrstava u razred SR2.

Svi testovi na svježem betonu pokazali su dobru i sličnu konzistenciju svih mješavina, a među njima je M-PRT imao najveću obradivost po svim ispitnim testovima. Ispitivanja su potvrdila da je beton koji sadrži silicijsku prašinu više kohezivan i manje podložan segregaciji, stoga je M-SF bila najmanje obradiva mješavina. Među mješavinama samozbijajućeg betona, M-SF je imala najmanju gustoću u svježem stanju, dok je M-FT imala najveću i bila je 5,96 % veća od gustoće mješavine M-SF. Najveća gustoća mješavine M-FT može se objasniti nižom apsorpcijom vode i manjim postotkom udjela plastifikatora kako bi se zadovoljila željena konzistencija, što znači da agregat, cement i mineralni dodatak imaju veći udio u kubnom metru betona. Na isti način, najmanja gustoća M-SF mješavine može se objasniti najvećom apsorpcijom vode i visokim postotkom udjela plastifikatora, a time i manjim postotkom udjela agregata, cementa i mineralnog dodatka u usporedbi s ostalim mješavinama.

4.2. Tlačna čvrstoća

Među mješavinama samozbijajućeg betona, M-FA mješavina je nakon 2 dana imala najveću tlačnu čvrstoću i bila je 7,2 % veća od najmanje tlačne čvrstoće M-SF. M-SF mješavina je imala najveću tlačnu čvrstoću nakon 7 dana, što je 15,7 % više od čvrstoće M-FT mješavine, koja je imala najmanju. Nakon 28 dana, M-SF mješavina je imala najveću tlačnu čvrstoću i bila je 17,8 % veća od najniže čvrstoće M-PRT mješavine. Redoslijed čvrstoća među mješavinama samozbijajućeg betona nakon 28 dana nije promijenjen i nakon 90 dana M-SF mješavina je imala najveću tlačnu čvrstoću, što je 19,5 % više od najmanje čvrstoće M-PRT mješavine. M-SF mješavina je imala najveću tlačnu čvrstoću zbog najvećeg postotka udjela S_iO_2 , koji ima najveći pucolanski utjecaj.

Kad su mješavine samozbijajućeg betona uspoređene s konvencionalnim betonom, dobiveni rezultati pokazuju da sve mješavine samozbijajućeg betona imaju veće tlačne čvrstoće. Najveće tlačne čvrstoće mješavina samozbijajućeg betona pri starosti od 2, 7, 28, 90 dana bile su 23,14 %, 28,28 %, 32,54 %, 24,5 % veće, odnosno, u odnosu na čvrstoće konvencionalnog betona, dok su najmanje tlačne čvrstoće mješavina samozbijajućeg betona pri starosti od 2, 7, 28, 90 dana bile 14,28 %, 8,17 %, 8,96 % i 4,17 % veće.

4.4. Vlačna čvrstoća pri savijanju

Među mješavinama samozbijajućeg betona, M-FT mješavina je imala najveću vlačnu čvrstoću pri savijanju nakon 28 dana i bila je 22,57 % veća od čvrstoće M-SF mješavine koja je imala najmanju. Zamjenom određene količine punila u betonskim mješavinama mineralnim dodacima smanjuje se poroznost, a sitne čestice mineralnog dodatka predstavljaju dodatne jezgre hidratacije, što dovodi do boljeg očvršćivanja cementne paste, odnosno povećanja vlačne čvrstoće pri savijanju i cijepanju u odnosu na beton bez dodataka.

Sve mješavine samozbijajućeg betona imale su veće vlačne čvrstoće pri savijanju u usporedbi s konvencionalnim betonom. Najveća vlačna čvrstoća pri savijanju mješavina samozbijajućeg betona bila je 96,06 % veća od čvrstoće konvencionalnog betona, a najniža čvrstoća mješavina samozbijajućeg betona bila je 51,82 % veća.

4.5. Vlačna čvrstoća pri cijepanju

Kada su mješavine samozbijajućeg betona uspoređene međusobno, mješavina M-FA je imala najveću vlačnu čvrstoću pri cijepanju nakon 28 dana, što je 24,94 % više od čvrstoće M-SF mješavine, koja je imala najmanju. Različiti mineralni dodaci drugačije utječu na prirast vlačne čvrstoće, a pritom ne postoji direktna veza između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće. Prema tome, zabilježene razlike u vlačnim čvrstoćama mješavina s različitim mineralnim dodacima ne treba ovdje objašnjavati. Autori pretpostavljaju da spomenuta razlika potječe od razlika u mikrostrukturi ovih materijala, ali se na osnovi opsežnosti obavljenih ispitivanja ne mogu izvesti pouzdani zaključci o tome. Ovaj bi fenomen svakako trebalo detaljnije istražiti, što može biti predmet nekog budućeg istraživanja.

Sve mješavine samozbijajućeg betona imale su manje vlačne čvrstoće pri cijepanju u odnosu na konvencionalni beton. Najveća vlačna čvrstoća pri cijepanju mješavina samozbijajućeg betona bila je 11,98 % manja od čvrstoće konvencionalnog betona, a najniža čvrstoća mješavina samozbijajućeg betona bila je 33,93 % manja.

5. Zaključak

Glavni je cilj ovog istraživanja procijeniti utjecaj različitih industrijskih nusproizvoda kao mineralnih dodataka za samozbijajući beton. Rezultati istraživanja pokazuju sljedeće:

- Mješavina s flotacijskom jalovinom imala je najveću zapreminsku masu u odnosu na druge mješavine samozbijajućeg betona.
- Mješavina s mljevenim otpadnim crijepovima imala je najveću obradivost u svježem stanju u odnosu na druge mješavine samozbijajućeg betona
- Mješavina sa silicijskom prašinom je imala najveću tlačnu čvrstoću nakon 28 dana u odnosu na druge mješavine samozbijajućeg betona
- Redoslijed tlačnih čvrstoća nakon 28 dana nije promijenjen u odnosu na redoslijed čvrstoća nakon 90 dana.
- Mješavina sa flotacijskom jalovinom je imala najveću vlačnu čvrstoću pri savijanju nakon 28 dana u odnosu na druge mješavine samozbijajućeg betona

- Mješavina sa elektrofilterskim pepelom je imala najveću vlačnu čvrstoću pri cijepanju nakon 28 dana u odnosu na druge mješavine samozbijajućeg betona.

Ovo je istraživanje pokazalo da se opisani industrijski otpadni materijali mogu upotrebljavati i kao punila u samozbijajućim betonima. Time se pridonosi rješavanju ekološkog problema odlaganja otpadnih materijala, a uz to se dobivaju betoni s boljim mehaničkim karakteristikama u odnosu na konvencionalni beton. Mješavina samozbijajućeg betona sa silicijskom prašinom kao mineralnim dodatkom pokazala se kao najpovoljnija u usporedbi s drugim ispitanim mješavinama. Sve mješavine samozbijajućeg betona pokazale su veće tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće pri savijanju, ali niže vlačne čvrstoće pri cijepanju u odnosu na konvencionalni beton.

LITERATURA

- [1] Štirmer, N., Banjad Pecur, I.: Mix design for self-compacting concrete, *Gradjevinar*, 61 (2009) 4, pp. 321-329.
- [2] Saleh, A.R., Tahir, K.E., Kambiz, R.: Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 75 (2015), pp. 89-98., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.014>
- [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), pp. 1594-1600., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.016>
- [4] Despotović, I.: Effect of different mineral supplements on the properties of self-compacting concrete, Faculty of Civil Engineering and Architecture in Niš, Dissertation, 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-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 30 (2012), pp. 161-168., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.046>
- [6] Siddique, R.: Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash, *Materials and Design*, 32 (2011), pp. 1501-1507., <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.043>
- [7] Khatib, J., M.: Performance of self-compacting concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 1963-1971., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011>
- [8] Sukumar, B., Nagamani, K., Srinivasa, R., R.: Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume of fly ash, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 1394-1401., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.005>
- [9] Bernardinus, H., Adhi, M.S.: Self-Compacting Concrete with Recycled Traditional Roof Tile Powder, The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering, 2013, pp. 805-816., <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.074>
- [10] Mohsen, T., Abderrazek, K., Mongi, B.O.: Incorporation of fillers from marble and tile wastes in composition of self-compacting concretes, *Construction and Building Materials*, 91 (2015), pp. 65-70., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.052>
- [11] Mohamed, N., Zohdy, K.M., Abdelkreem, M.: Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks, *Construction and Building Materials*, 38 (2013), pp. 101-109., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.114>
- [12] Shi, C., Mayer, C., Behnood, A.: Utilization of copper slag in cement and concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (2008), pp. 1115-1120., <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.008>
- [13] 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), pp. 79-86., doi number is not available
- [14] Onuaguluchi, O., Eren, O.: Cement mixtures containing copper tailings as an additive: durability properties, *Materials Research*, 15 (2012), pp. 1029-1036., <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000129>
- [15] Dehwah, H.A.F.: Corrosion resistance of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume and fly ash, *Construction and Building Materials*, 37 (2012), pp. 277-282., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.078>
- [16] Chung, D.D.L.: Review Improving cement-based materials by using silica fume, *Journal of Materials Science*, 37 (2002), pp. 673-682., doi number is not available
- [17] SRPS EN 197-1: 2013. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, The Institute for Standardization of Serbia, 2013.
- [18] EN 206: 2013. Concrete – Specification, performance, production and conformity, European Committee for Standardization, 2013.

- [19] SRPS EN 12620: 2010. Aggregate for concrete, The Institute for Standardization of Serbia, 2010.
- [20] SRPS EN 12350-8: 2012. Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test, The Institute for Standardization of Serbia, 2012.
- [21] EFNARC: Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2002.
- [22] SRPS EN 12390-3: 2010. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, the Institute for Standardization of Serbia, 2010.
- [23] SRPS EN 12390-5: 2010. Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens, The Institute for Standardization of Serbia, 2010.
- [24] SRPS EN 12390-6: 2012. Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, The Institute for Standardization of Serbia, 2012.
- [25] SRPS EN 196-3: 2010. Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness, The Institute for Standardization of Serbia, 2010.